

Image credit: DESY / Science Communication Lab.

L'astronomie du futur : voir le ciel sans lumière

Damien Dornic (CPPPM)

Conférence grand-public - 23/11/2019



Brève histoire de l'astronomie

En résumé, on peut classer 4 grandes périodes:

- De -10000 au 18ème siècle: **astronomie visible**
(position / magnitude)
- 19ème siècle: révolution de la **spectroscopie**
(composition / distance)
- 20ème siècle: révolution de l'**astronomie multi-longueurs d'onde**
- 21ème siècle: révolution de l'**astronomie multi-messagers**



Nébuleuse du crabe vu par Hubble (rouge) et par Chandra (bleu)

Astronomie visible

Depuis l'antiquité, les hommes ont toujours regardé le ciel, utilisé la position des étoiles (des constellations) pour s'orienter, se situer dans le temps...

Avec la 1^{ère} lunette créée par Galilée en 1609, on entre dans une nouvelle ère: on fait de l'astronomie, c'est à dire qu'on cartographie le ciel (positions et magnitudes). De nos jours, on a installé des télescopes partout dans le monde et dans l'espace.



Colibri



GWAC



VLT



Hubble HST

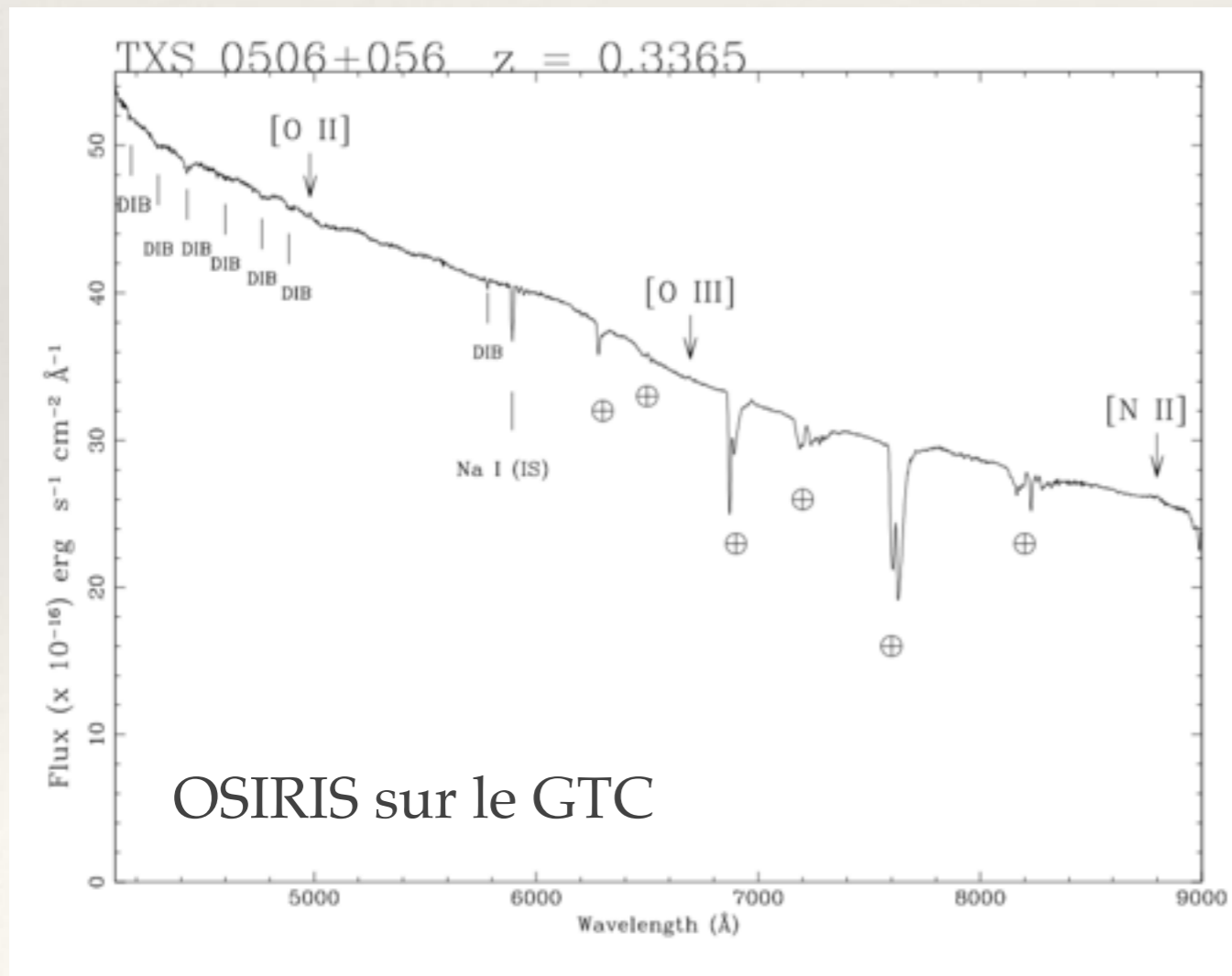
Spectroscopie

2^{ème} grande révolution: la spectroscopie

⇒ Donne pour la première fois accès à la

composition et aux distances des objets célestes

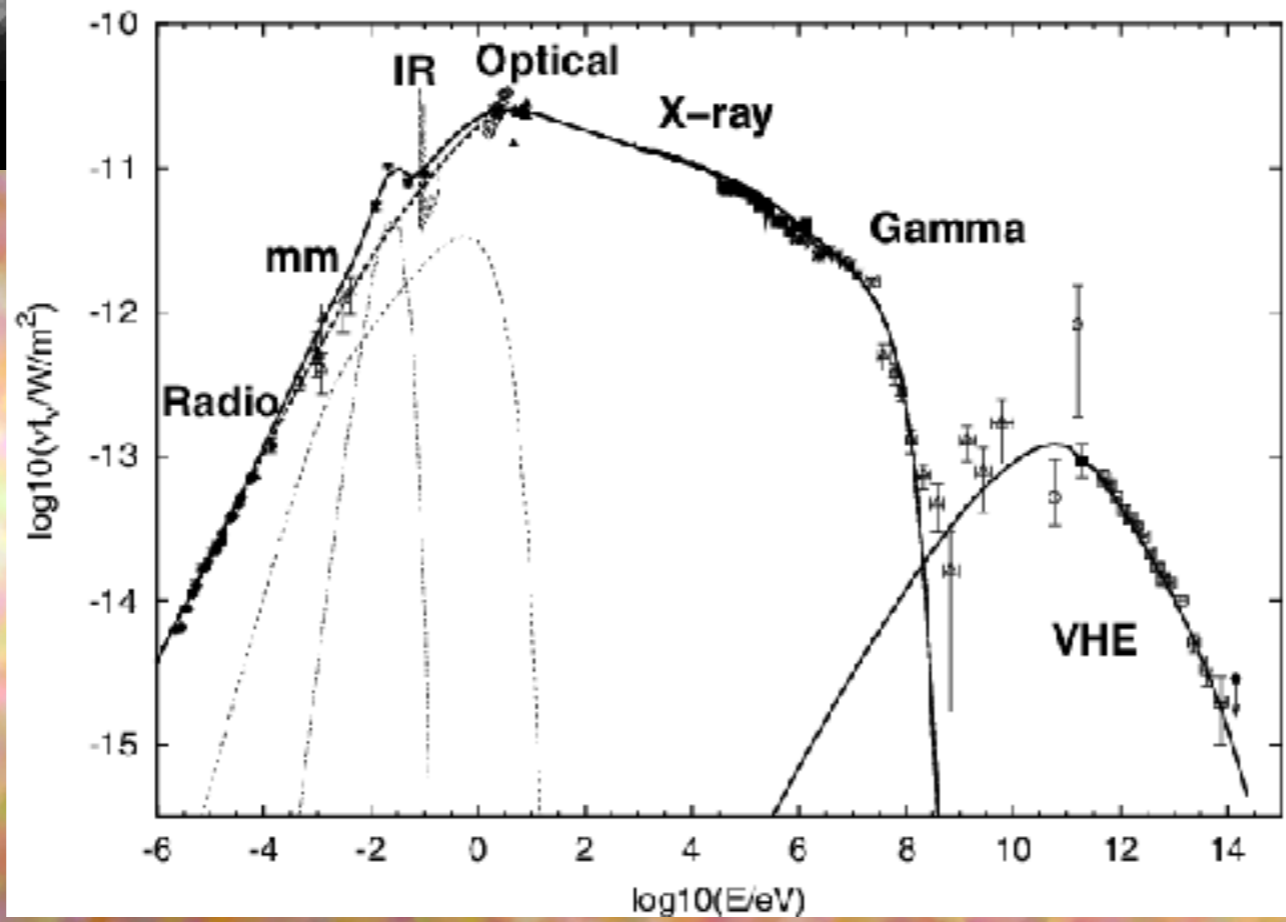
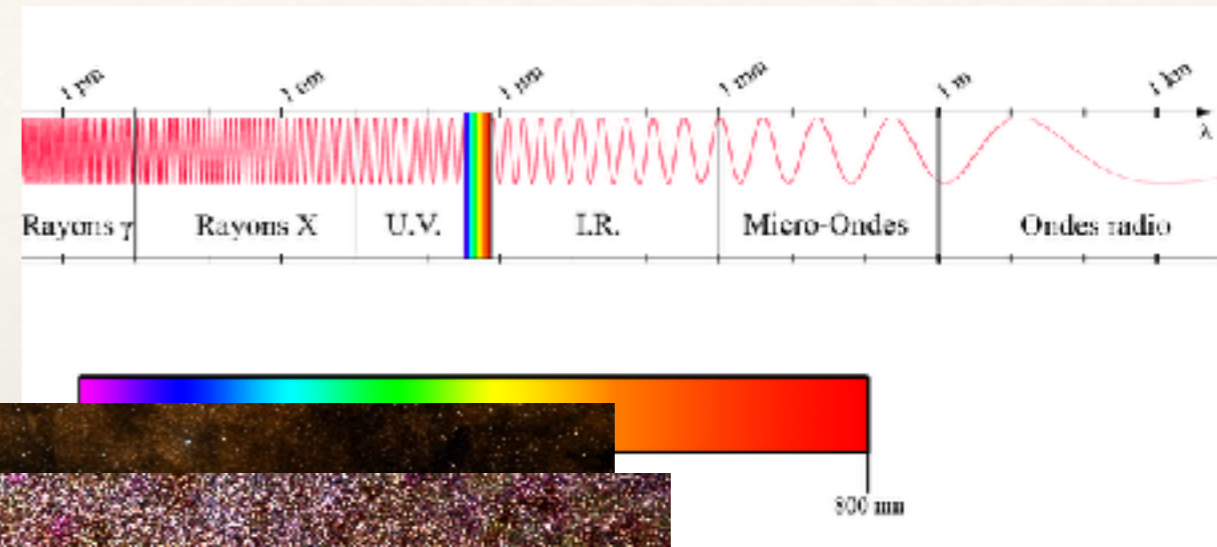
(via le décalage des raies absorption vers le rouge)



Elodie sur le telescope 193cm à l'OHP

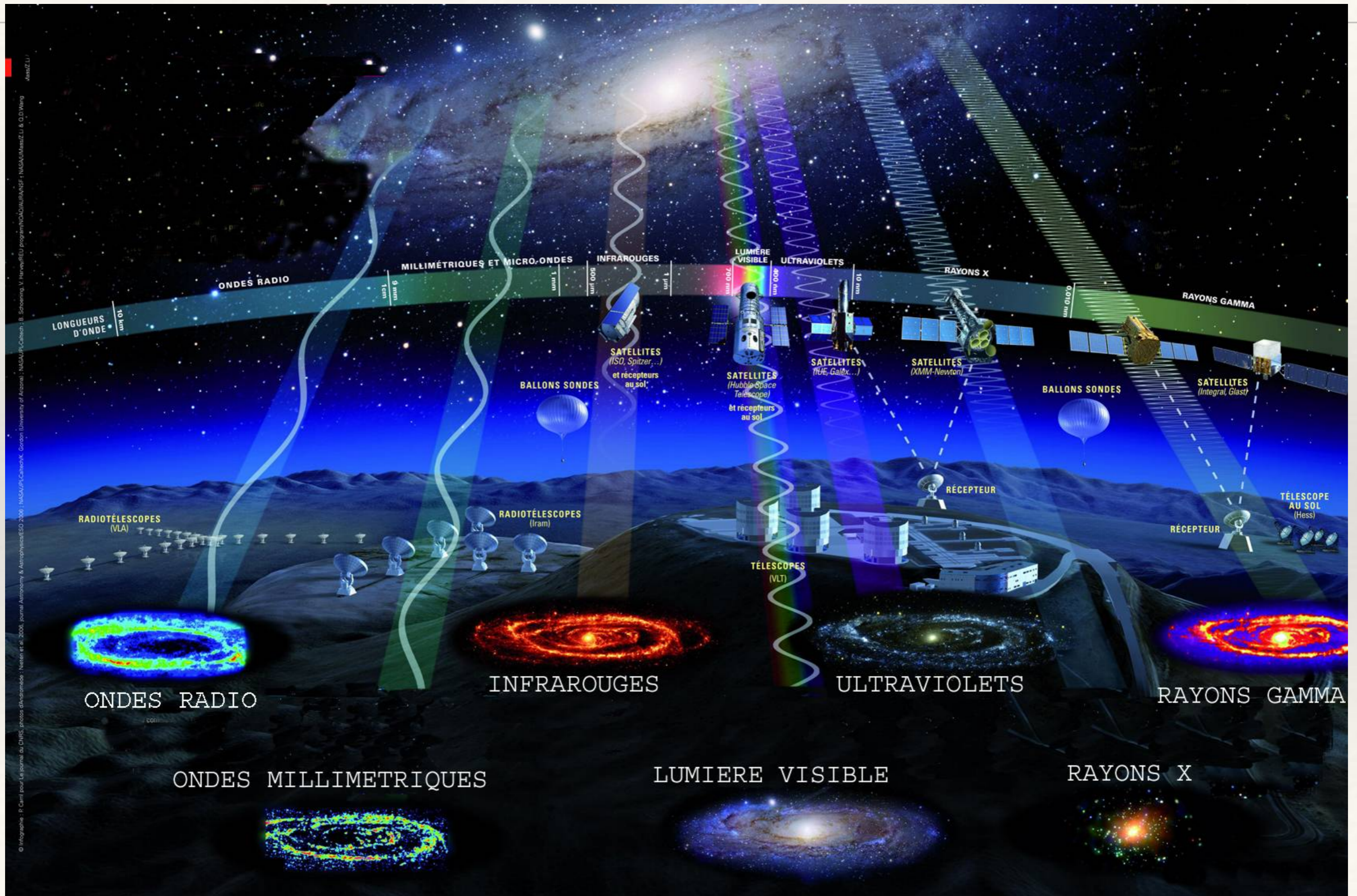
Astronomie multi-longueurs d'onde

La 3ème révolution est l'extension de l'astronomie optique à toutes les longueurs d'onde des ondes radio jusqu'au rayons γ de très haute énergie

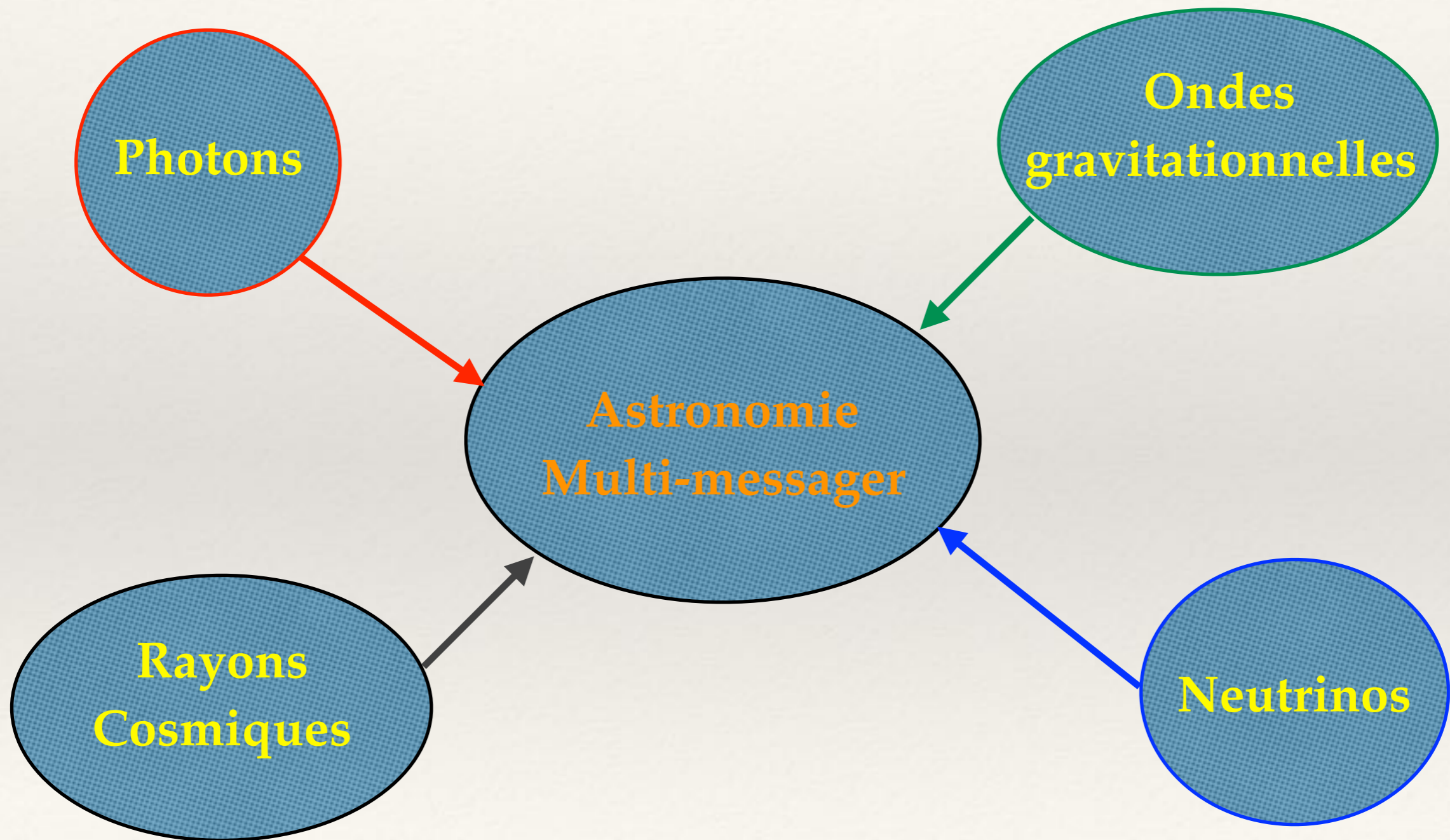


Visible
Infrarouge
Radio
Rayon X
Rayon γ
Distribution en
énergie de la
Nébuleuse du Crabe

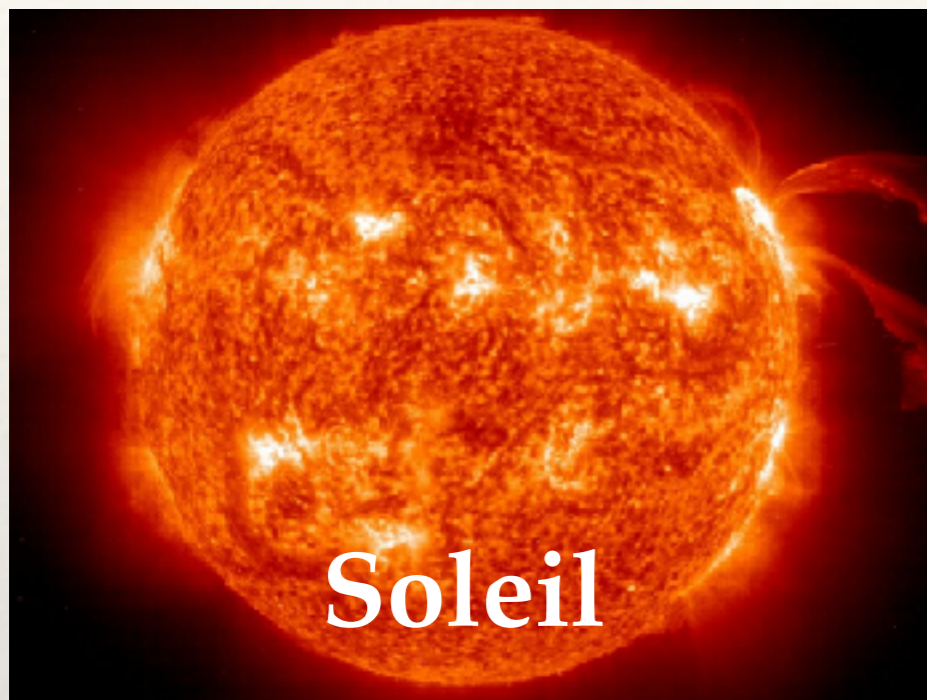
Astronomie multi-longueurs d'onde



Révolution du multi-messenger



Pour l'instant, 4 objets ont été vus en multi-messager



Neutrino
+ photon



GW
+ photon

Neutrinos

CHANGEMENTS DE DOMICILE:
carte de naissance

Nom: NEUTRINO
Prénom: Electron / Muon / Tau

Masse: Très faible
Charge: Neutre
Intération: Faible

Naissance: Réacteur nucléaire,
Etoile, espace,
Atmosphère
Eléments radioactifs...

Profession: **Passe-muraille**


RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Mairie de *Martin-Luther-King*

Commissariat de Police

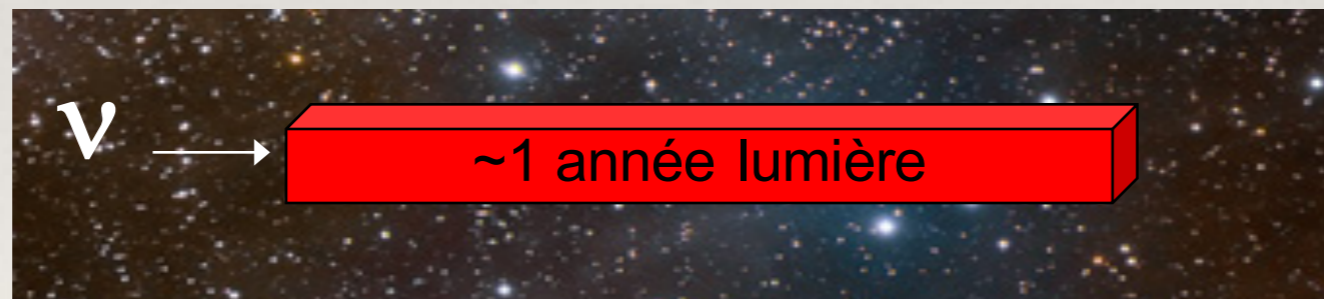
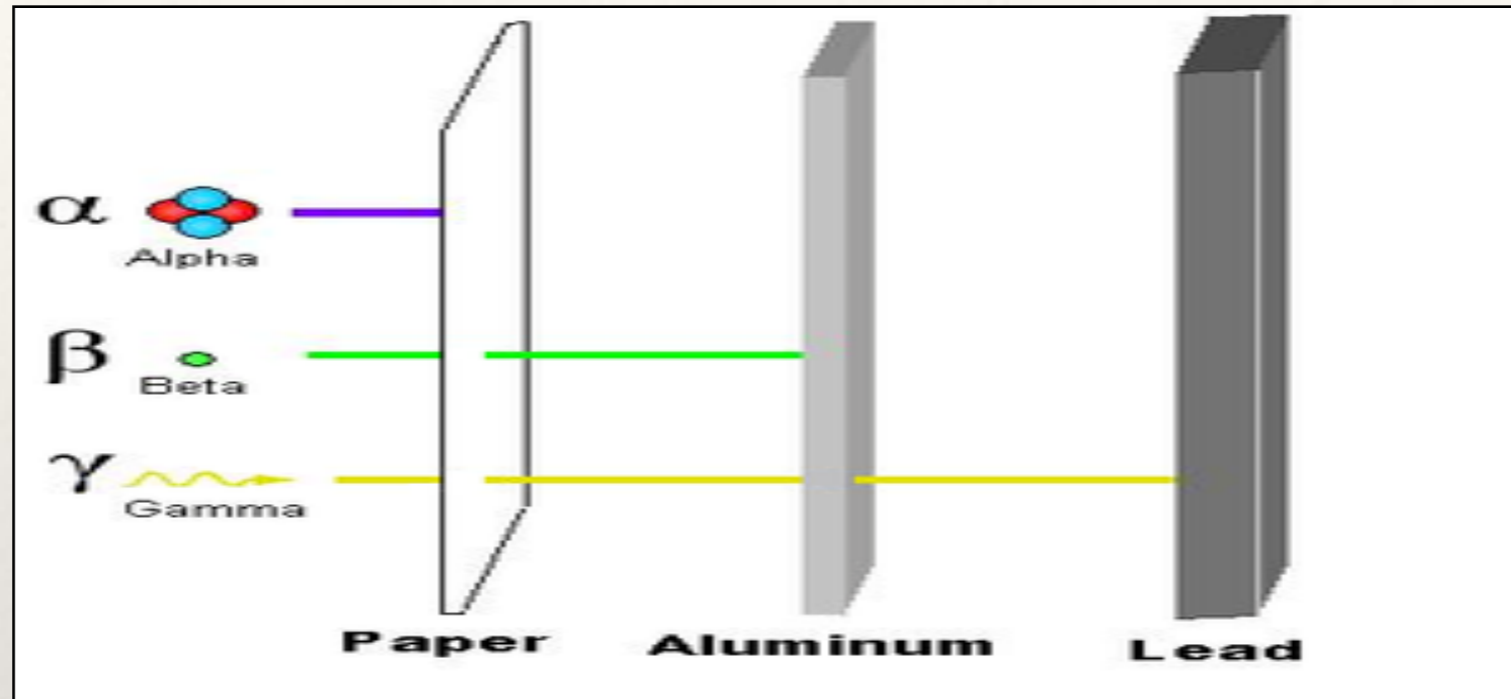
de

CARTE D'IDENTITÉ



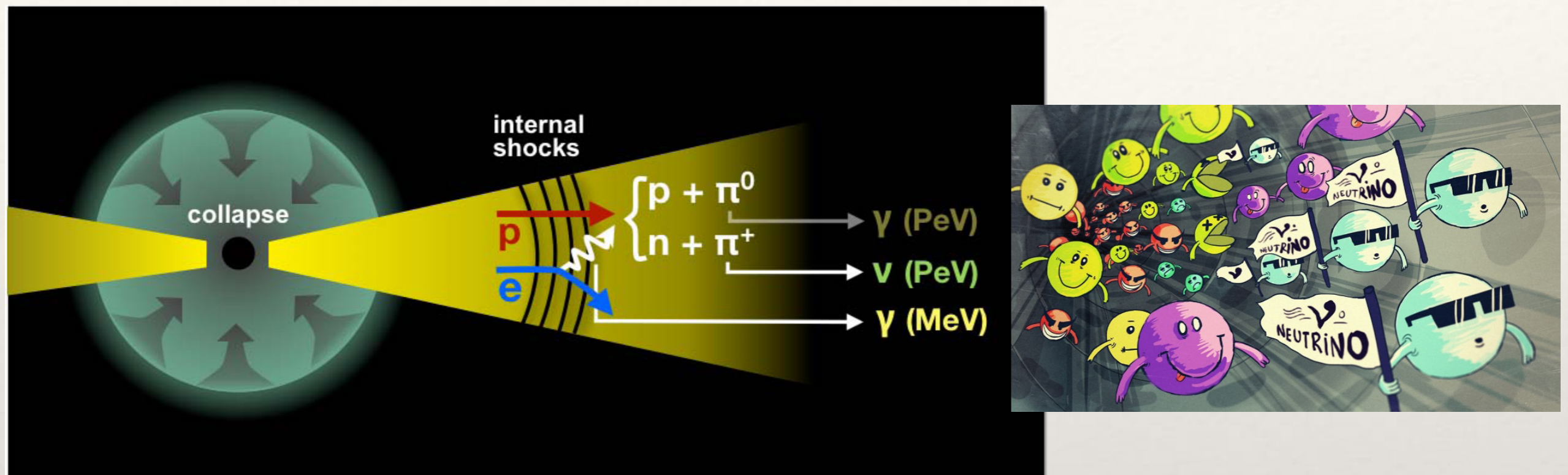
AD 11 STRASBOURG <STR> 15, B. DES JUIFS

Neutrinos: sonder l'intérieur des astres



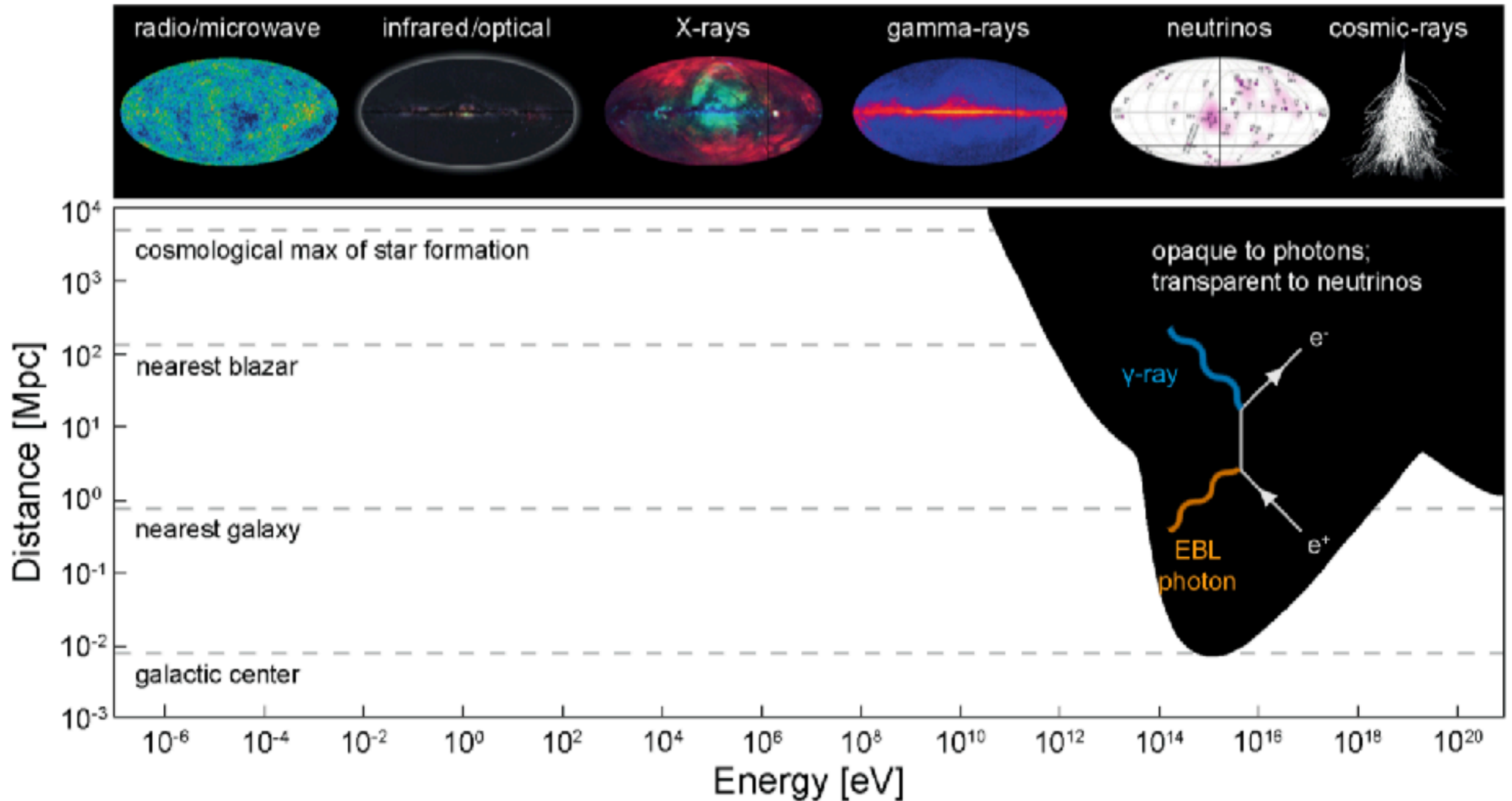
- Le neutrino peut sonder les régions les plus reculées de l'Univers
 - Le neutrino peut sonder les régions le plus intimes des objets cosmiques
- ⇒ Mais c'est très dur à détecter.

Production des neutrinos dans l'univers

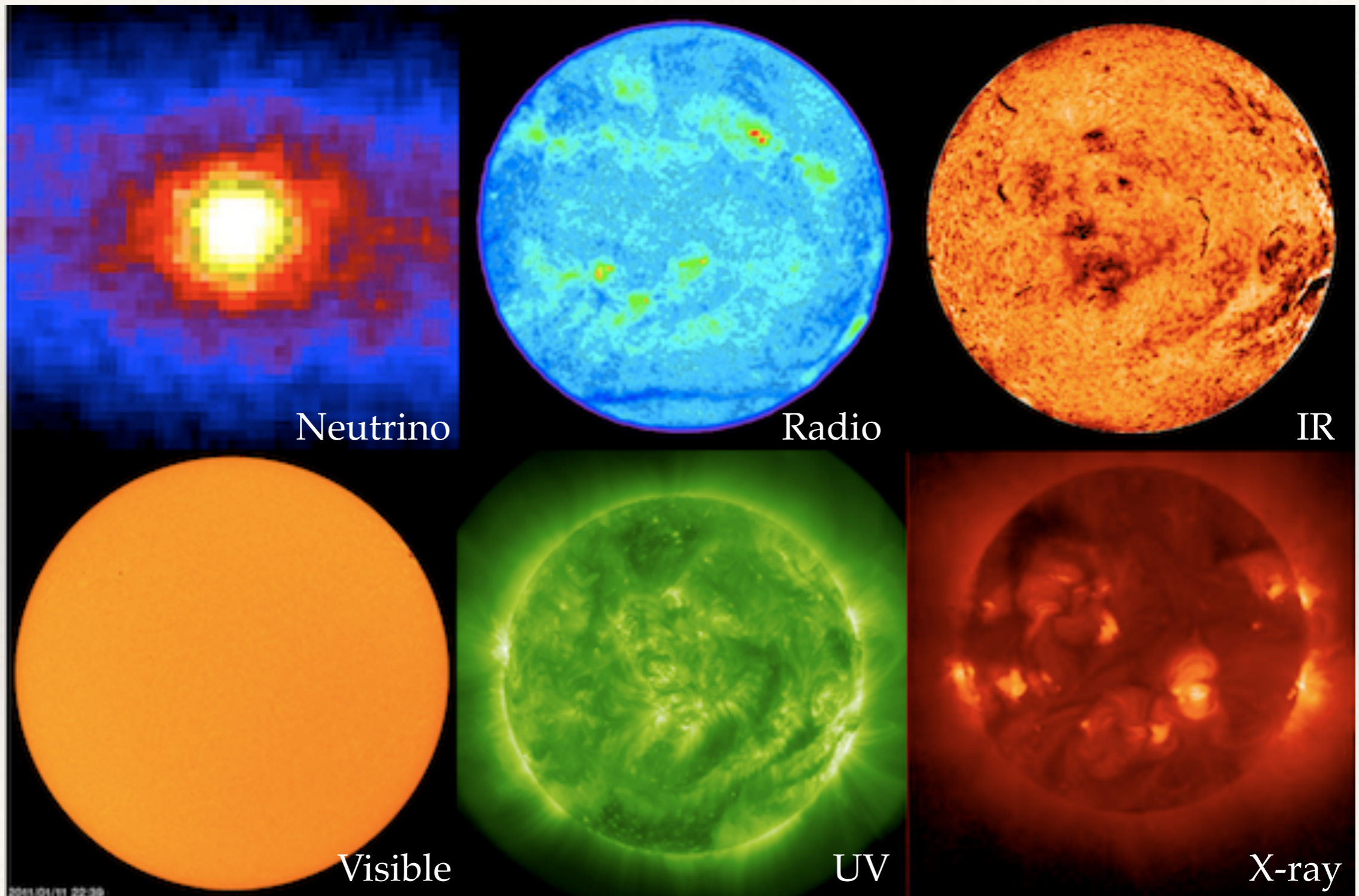


- 1) Dans ces sources opaques / denses, des **protons (ou noyaux) de haute énergie** peuvent interagir avec la matière et créer des **neutrinos de haute énergie**
- 2) Dans ces sources chaudes et denses, des **neutrinos thermonucléaires** peuvent être produits en quantité phénoménale

Neutrinos: Terra Incognita



Etude multi-messenger du soleil



Neutrinos du soleil

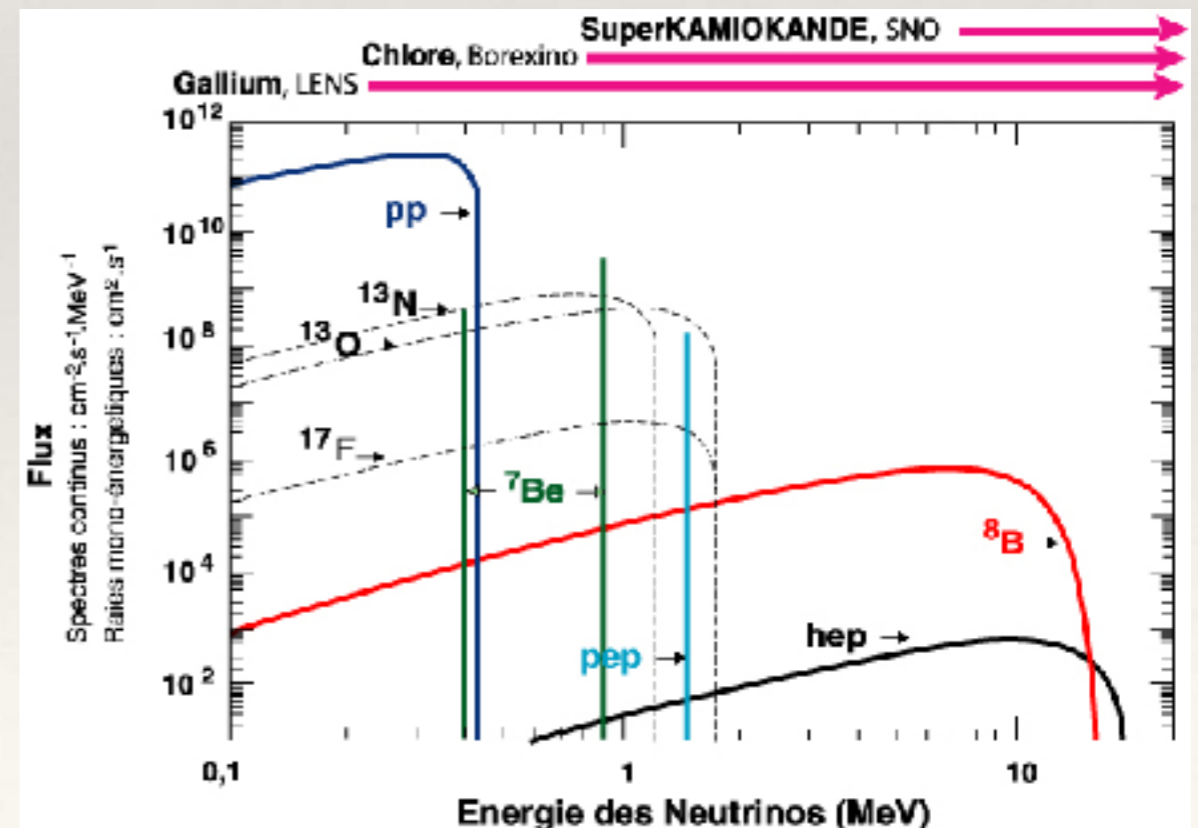
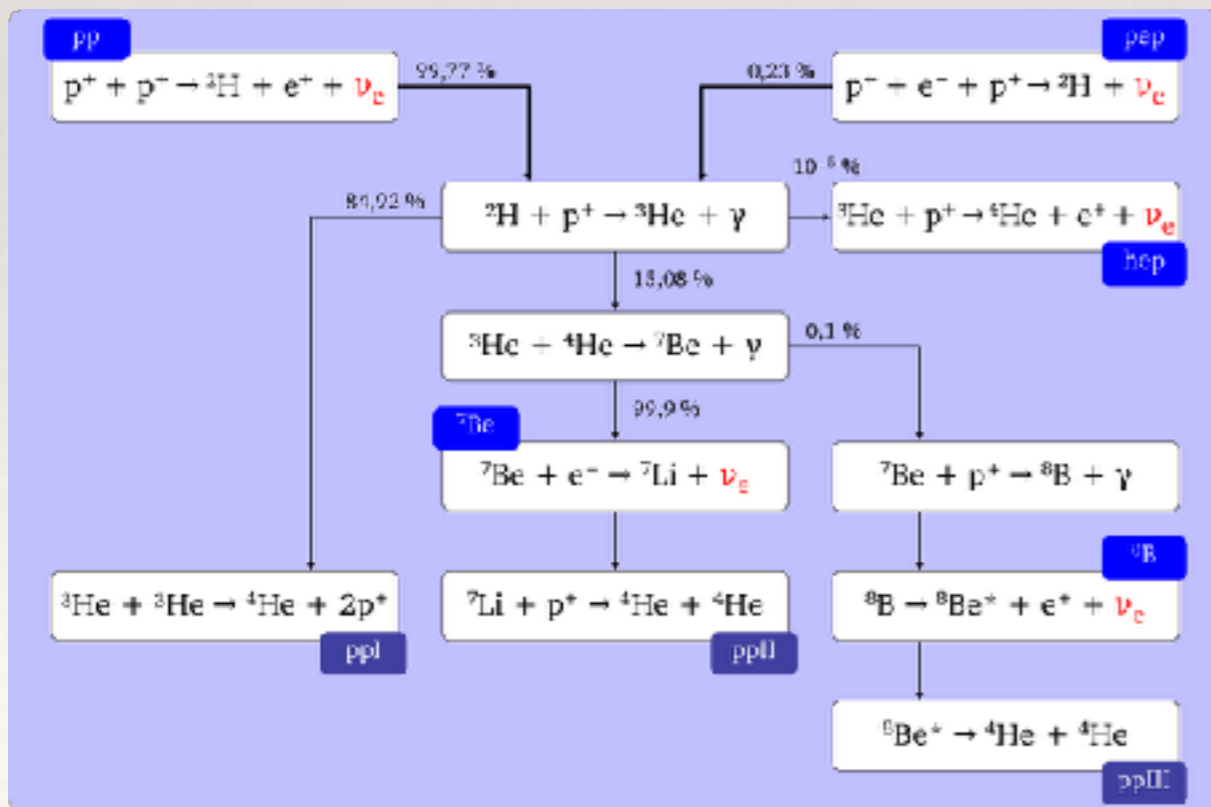
Qu'est ce que nous apprenne les neutrinos provenant du soleil ?

→ Permet de sonder l'intérieur du soleil (c'est la seule particule capable de s'extraire des profondeurs du soleil)

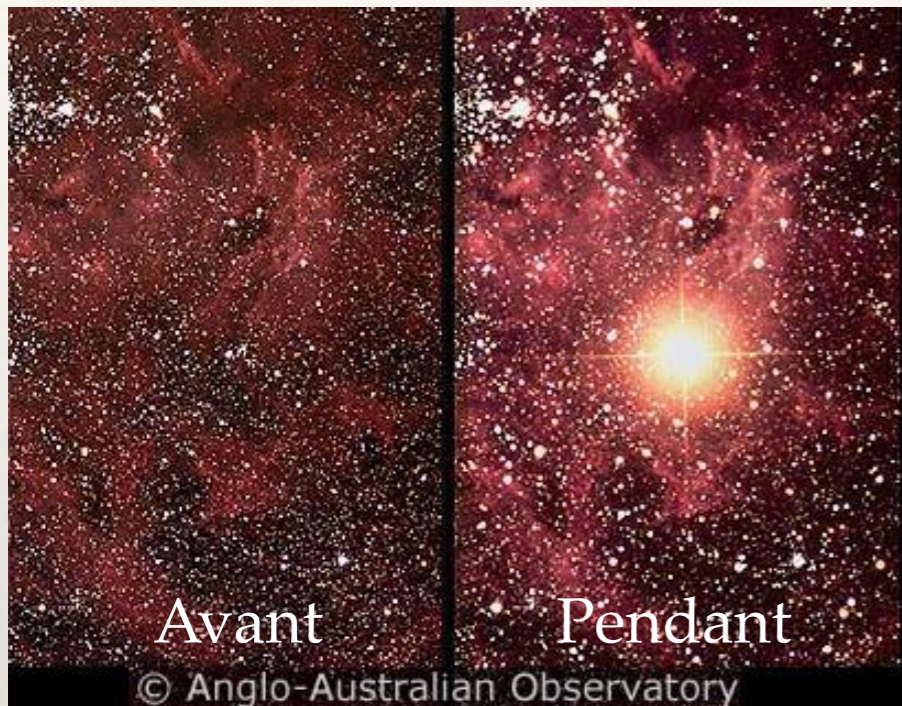
→ Connaitre comment marche en détail le soleil. Le soleil est un énorme réacteur à fusion nucléaire. Chaque réaction émet des neutrinos.

→ ~65 milliards de neutrinos traversent notre pouce toutes les secondes !

→ Découverte de la composition, durée de vie, quelles sont les interactions nucléaires, les oscillations des saveurs de neutrino, etc...



Supernova 1987a

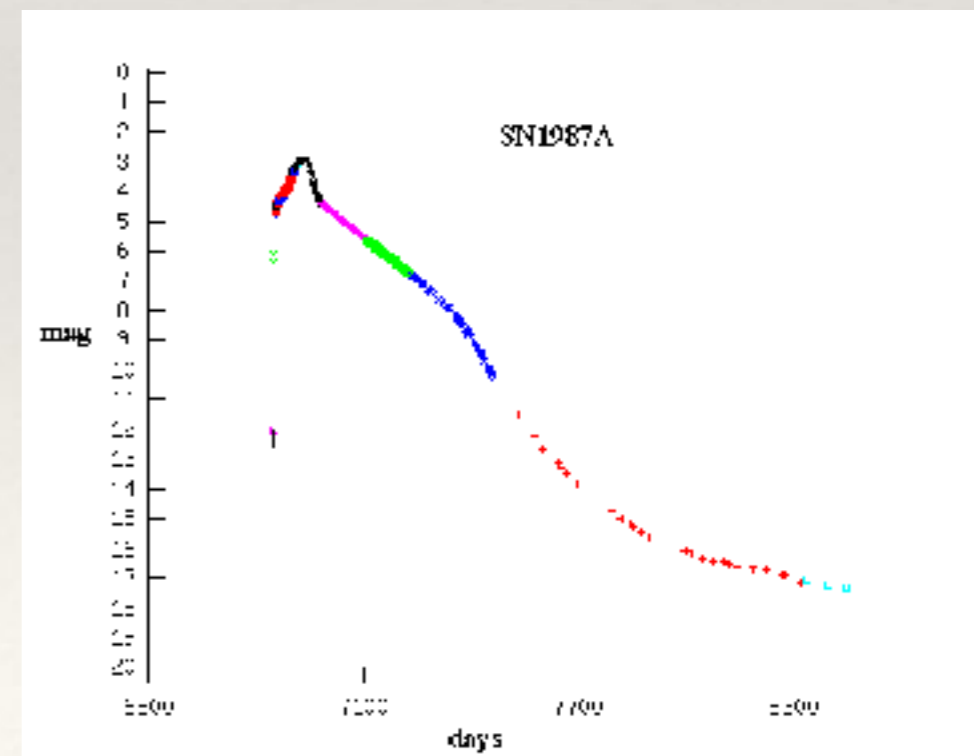


Qu'est ce qu'une supernova (type II)?

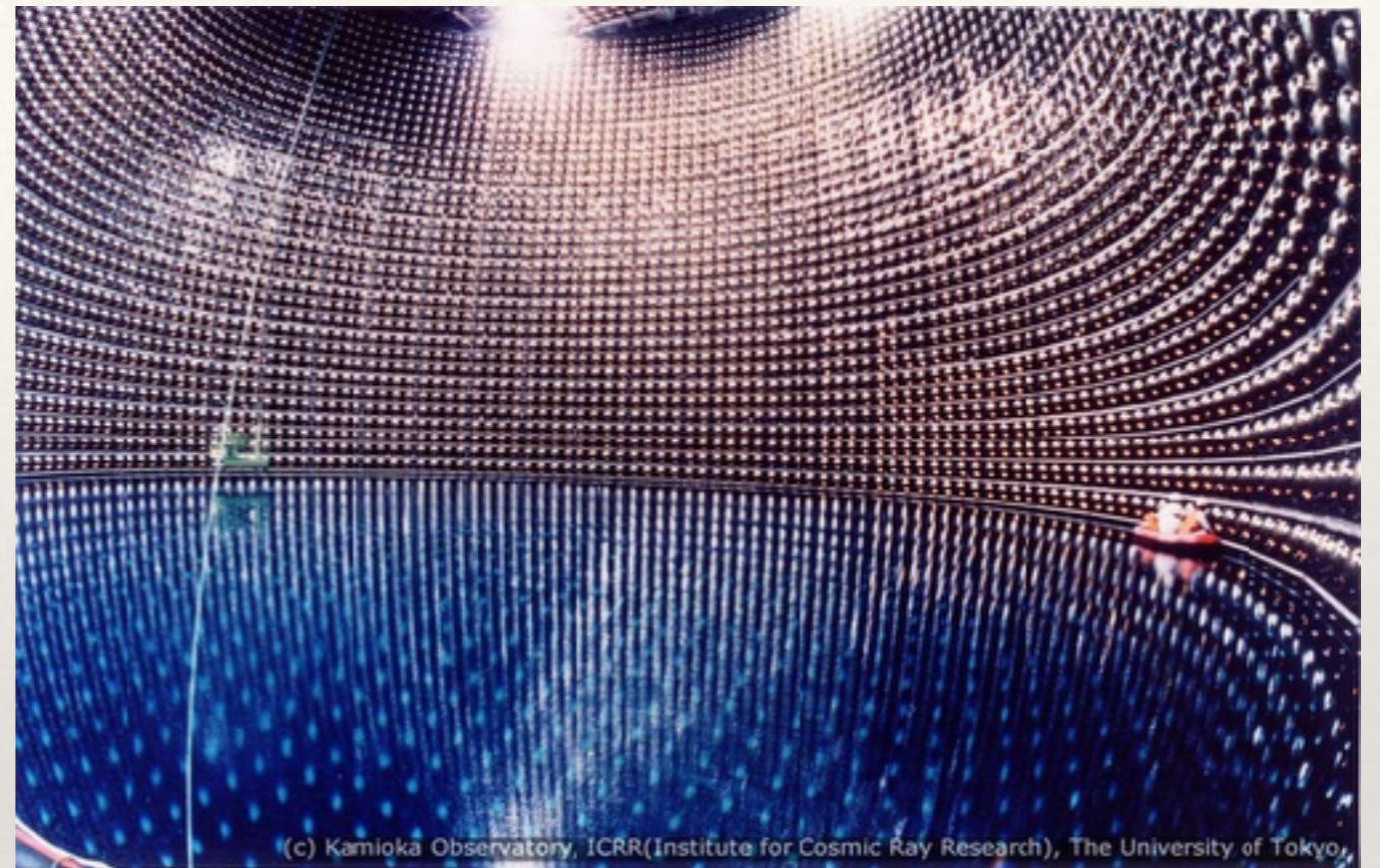
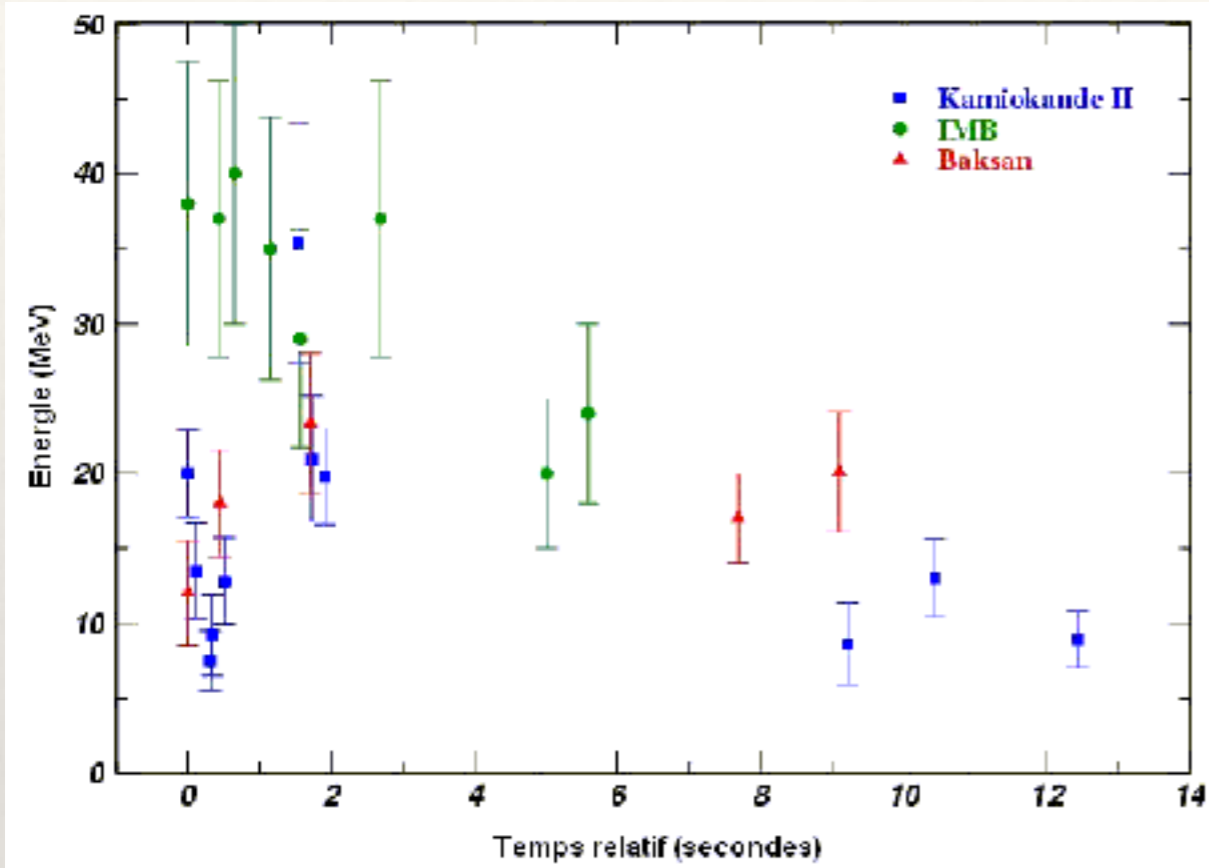
- Fin de vie d'une étoile massive ($> 20 M_{\text{sun}}$).
- Supernova: effondrement du coeur de l'étoile sous l'effet de la gravité, il se produit alors une émission lumineuse intense sur quelques semaines

SN1987a

- Super-géante bleu avec une masse de **20 Msun**
- Dans le grand nuage de Magellan (**51 kpc**)
- Explosion le **27/02/1987**, visible à l'oeil nu pendant quelques semaines (la dernière était en 1604 avec Kepler).
- Maximum en mai 1987, 2.9 magnitude
- Découverte par plusieurs astronomes professionnels et amateurs en Australie et Nouvelle-Zélande
- On continue de voir les restes de cette explosion



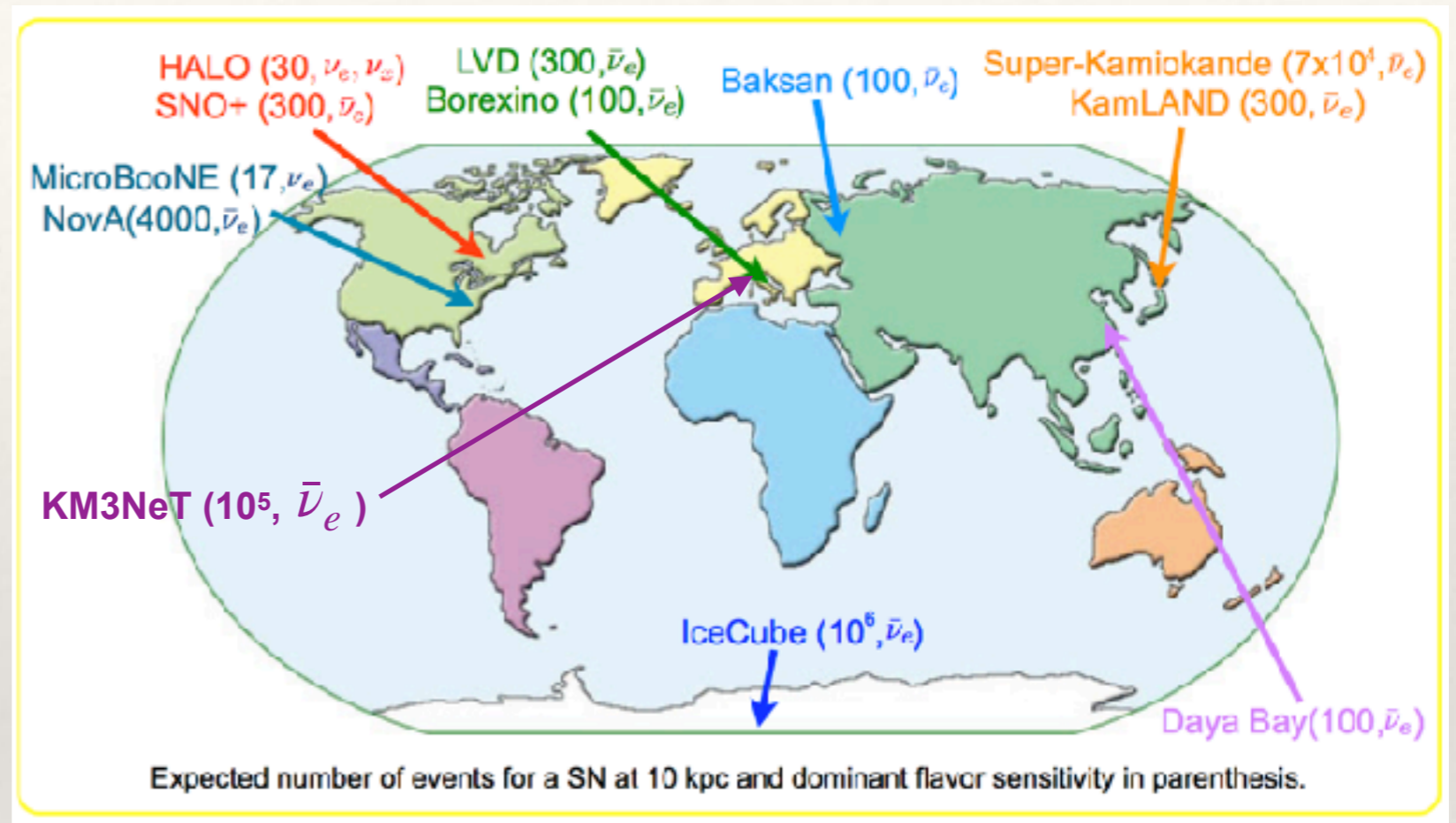
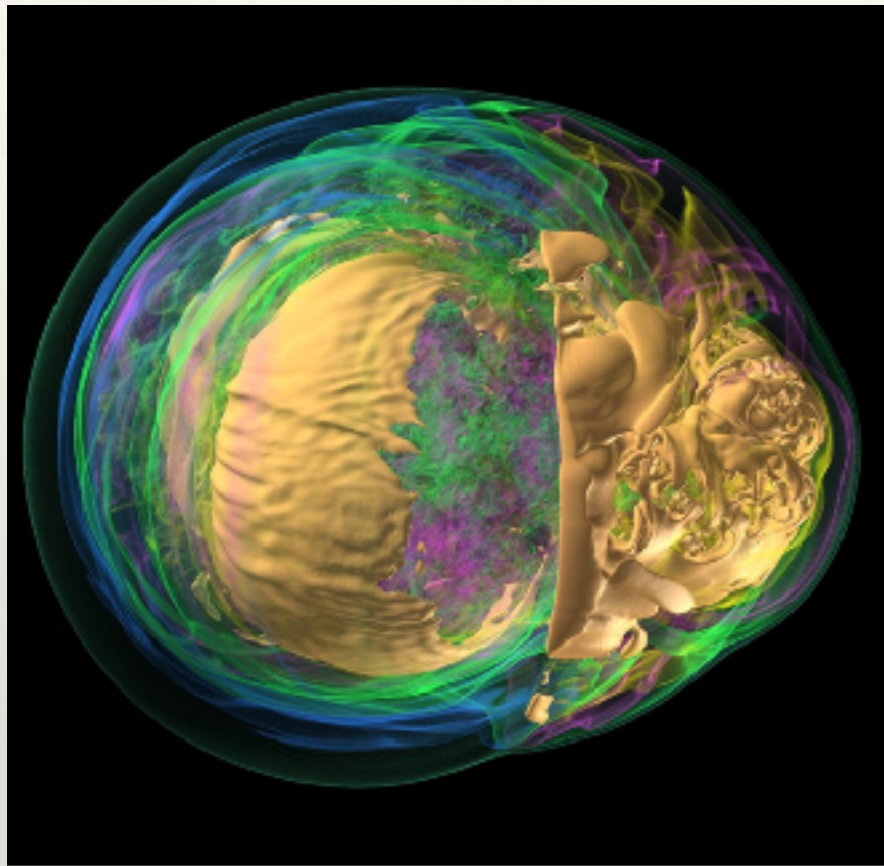
Neutrinos de SN1987a



Des neutrinos dans SN1987a?

- ~99% de l'énergie est émise sous forme de neutrinos thermonucléaires.
- Dans un environnement très dense, les protons peuvent capturer des électrons et se transformer en neutrons.
- 10^{57} neutrinos sont émis en quelques secondes avec une énergie moyenne de 10-40 MeV, 10^{16} ont traversés les 3 détecteurs, seuls une vingtaine ont été détectés !
- Les neutrinos sont arrivés ~3h avant le signal optique

Neutrinos de SN: et après



Et après ?

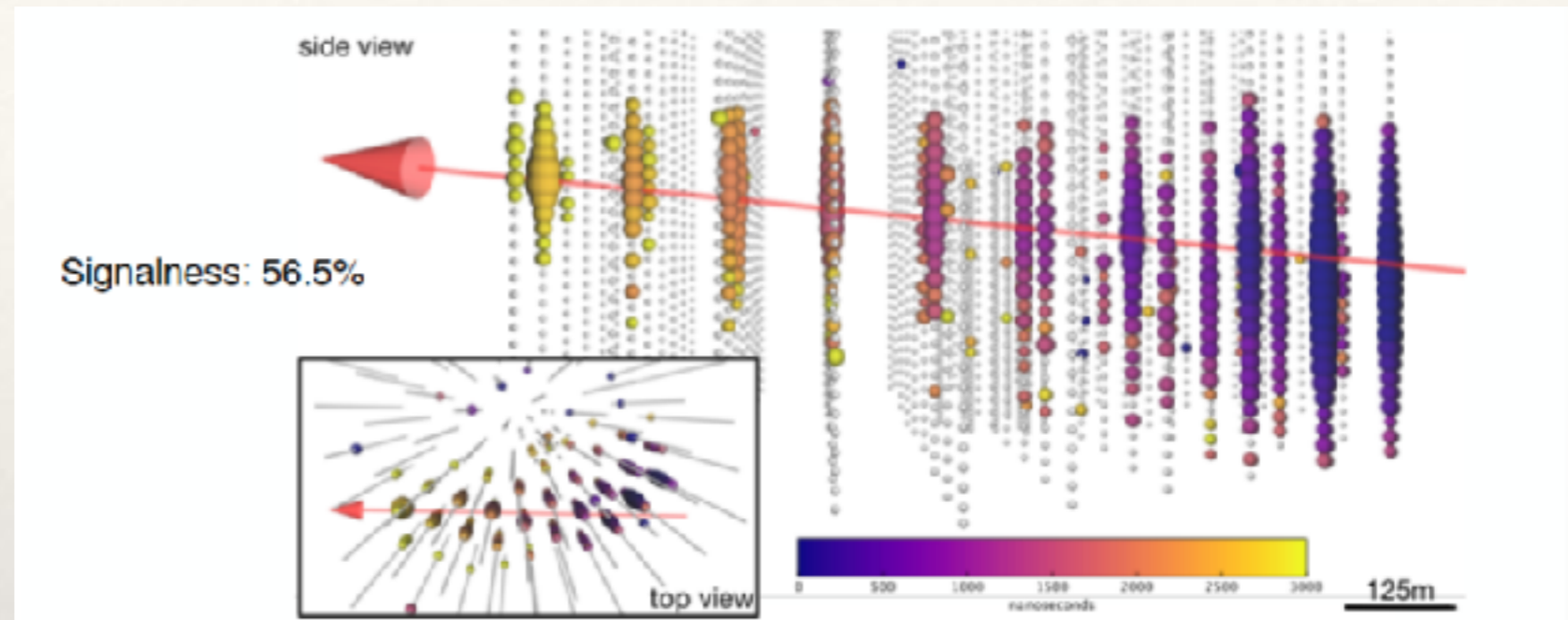
→ Le taux de SN galactique est de 1 à 3 par siècle

→ Avec les nouvelles generations d'instruments, on devrait pouvoir mesurer dix à cent milles neutrinos, cela nous permettra de faire des études fines de la courbe de lumière et ainsi de comprendre plus en détail comment fonctionne une supernova.

→ Important d'avoir un système d'alerte pour permettre de suivre la supernova le plus tot possible pour réduire l'erreur sur le délai entre les neutrinos et les photons.

Une alerte neutrino de TXS 0506+056

Le 22 septembre 2017, IceCube a détecté un neutrino de très haute énergie (~ 290 TeV)
 \Rightarrow 43s après l'événement, une notice a été envoyée pour alerter toute la communauté astro.



```
////////////////////////////////////  
TITLE: GCN/AMON NOTICE  
NOTICE_DATE: Fri 22 Sep 17 20:55:13 UT  
NOTICE_TYPE: AMON ICECUBE EHE  
RUN_NUM: 130033  
EVENT_NUM: 50579430  
SRC_RA: 77.2853d {+05h 09m 08s} (J2000),  
77.5221d {+05h 10m 05s} (current),  
76.6176d {+05h 06m 28s} (1950)  
SRC_DEC: +5.7517d {+05d 45' 06"} (J2000),  
+5.7732d {+05d 46' 24"} (current),  
+5.6888d {+05d 41' 20"} (1950)  
SRC_ERROR: 14.99 [arcmin radius, stat+sys, 50% containment]  
DISCOVERY_DATE: 18018 TJD; 265 DOY; 17/09/22 (yy/mm/dd)  
DISCOVERY_TIME: 75270 SOD {20:54:30.43} UT  
REVISION: 0  
N_EVENTS: 1 [number of neutrinos]  
STREAM: 2  
DELTA_T: 0.0000 [sec]  
SIGMA_T: 0.0000e+00 [dn]  
ENERGY: 1.1998e+02 [TeV]  
SIGNALNESS: 5.6507e-01 [dn]  
CHARGE: 5784.9552 [pe]
```

1ère notice d'IceCube avec le temps, les coordonnées, une estimation de la boîte d'erreur et les caractéristiques du neutrino

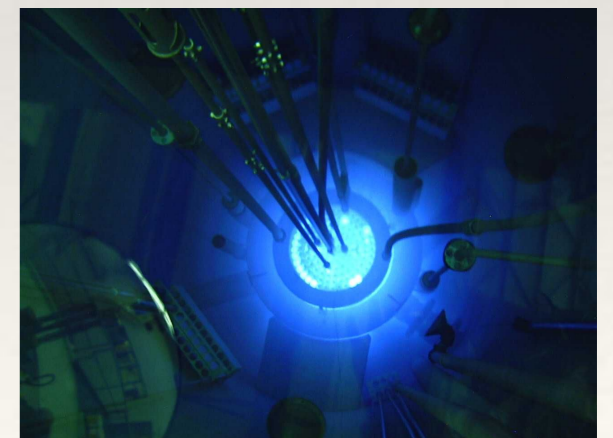
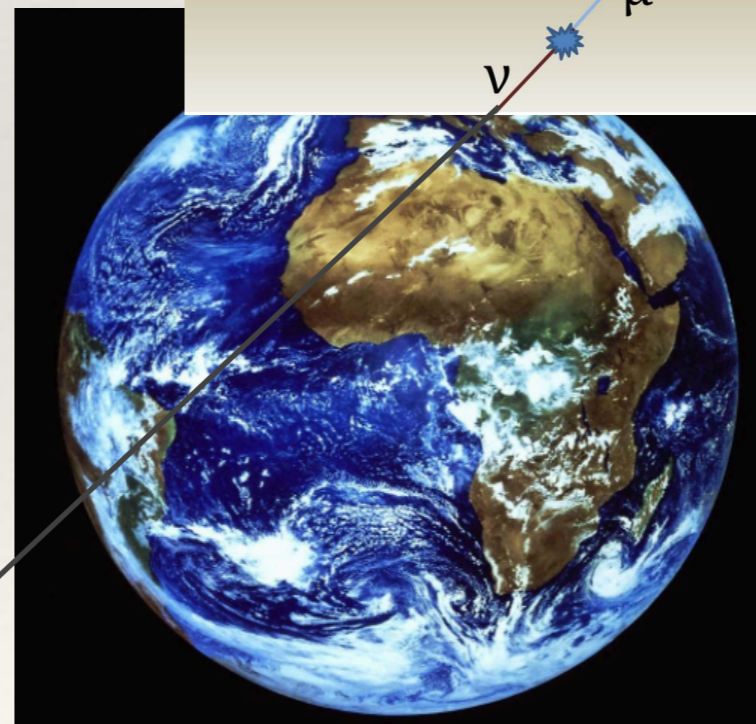
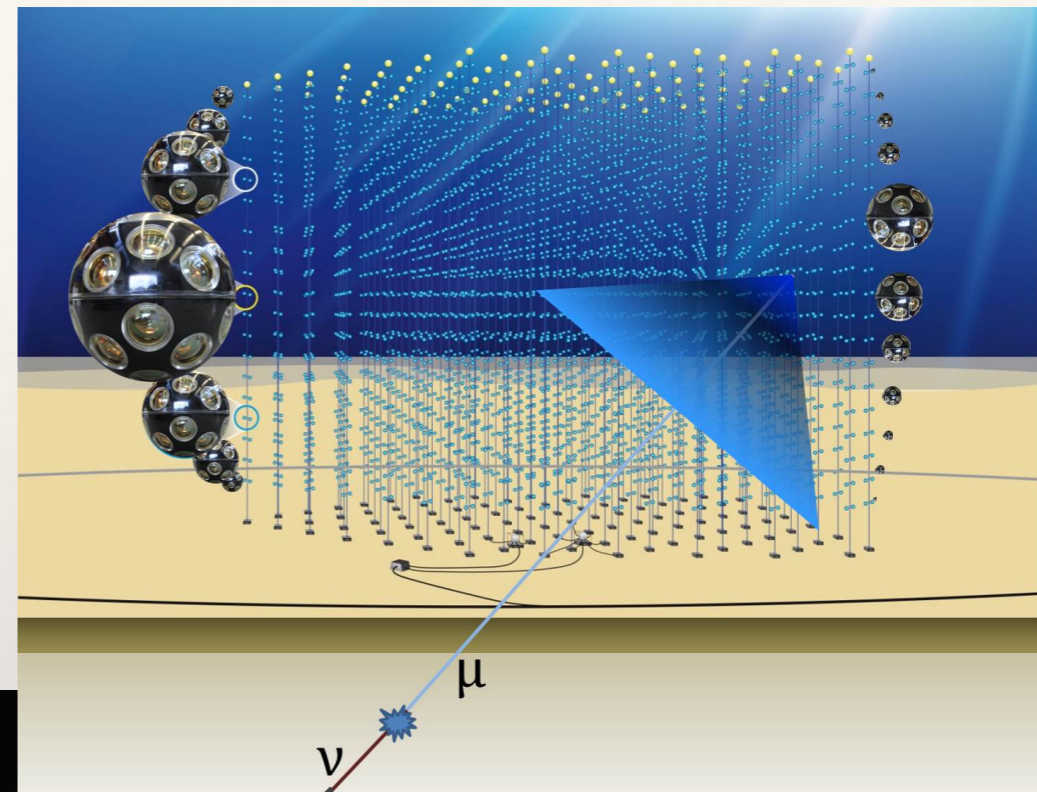
Comment ça marche un telescope à neutrino ?

→ Un neutrino, c'est extrêmement difficile à détecter. On va donc utiliser la plus grosse cible (miroir) qu'on connaisse, la Terre elle-même.

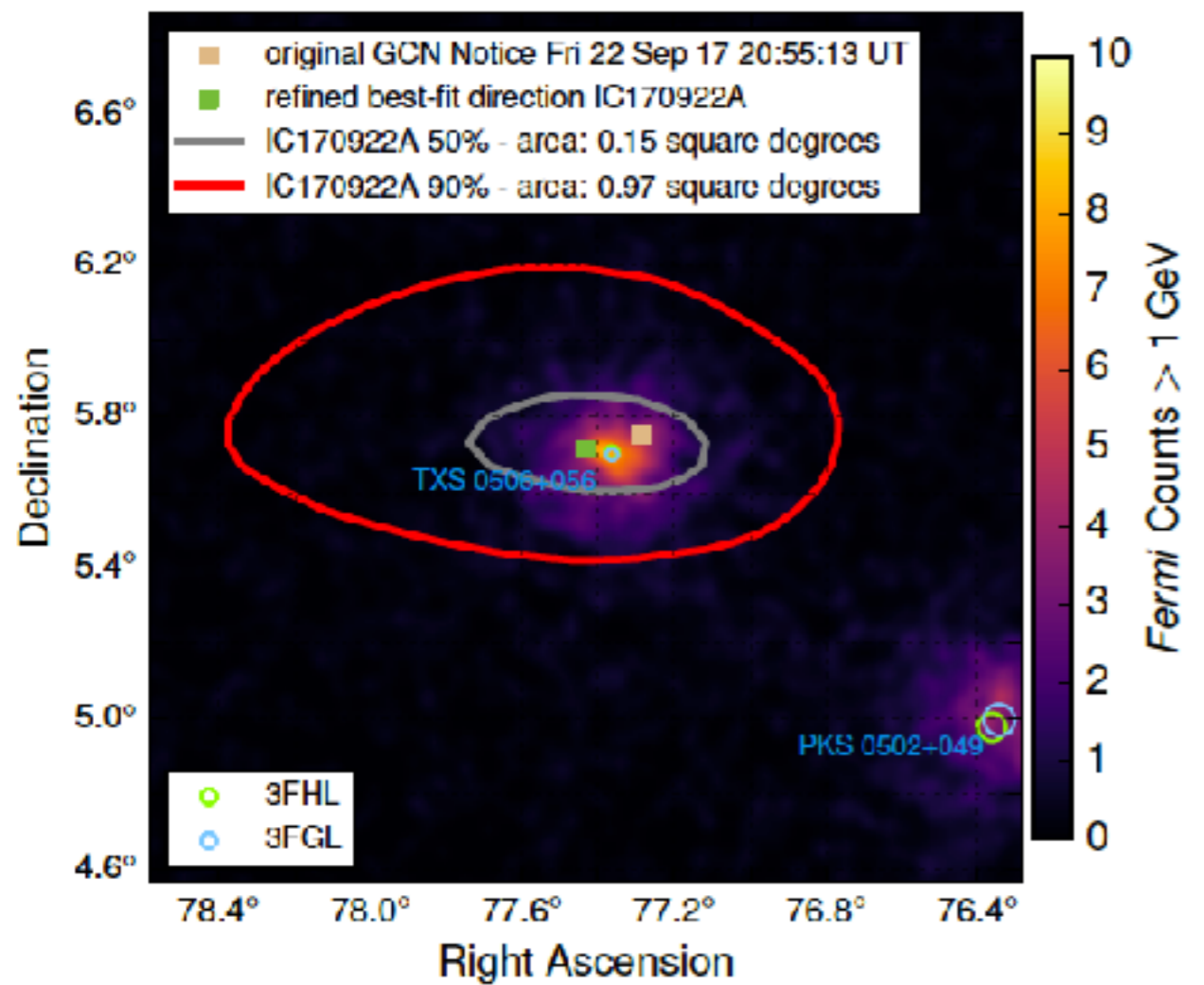
→ Le neutrino va interagir avec un atome de matière et se transformer en muon (ou electron / tau).

→ Le neutrino voyage plus vite que la vitesse de la lumière dans l'eau / glace et produit sur son passage une lumière Cherenkov bleue.

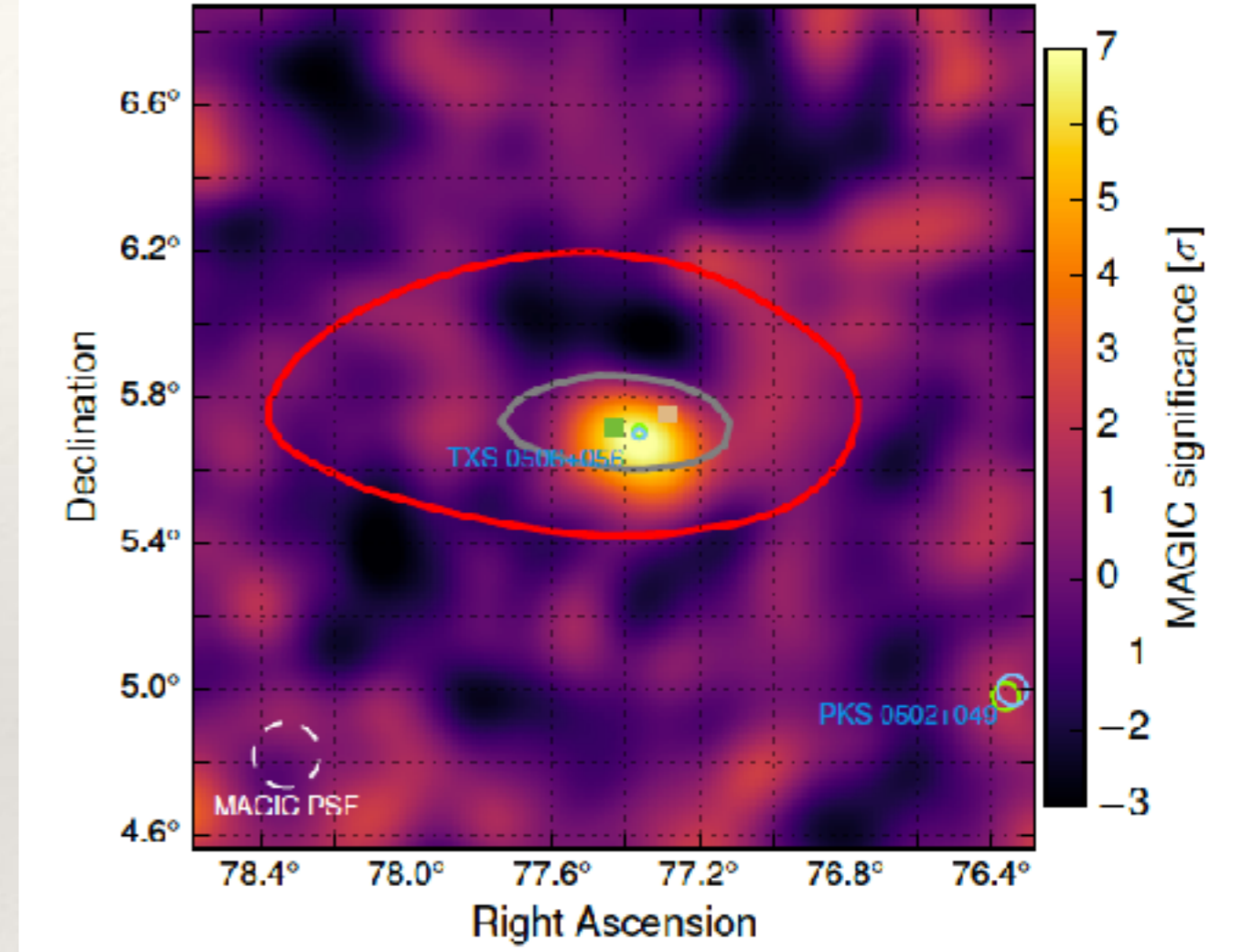
→ Cette trace lumineuse est finalement détectés par une « super camera ».



Suivi multi-longueurs d'onde de IC170922

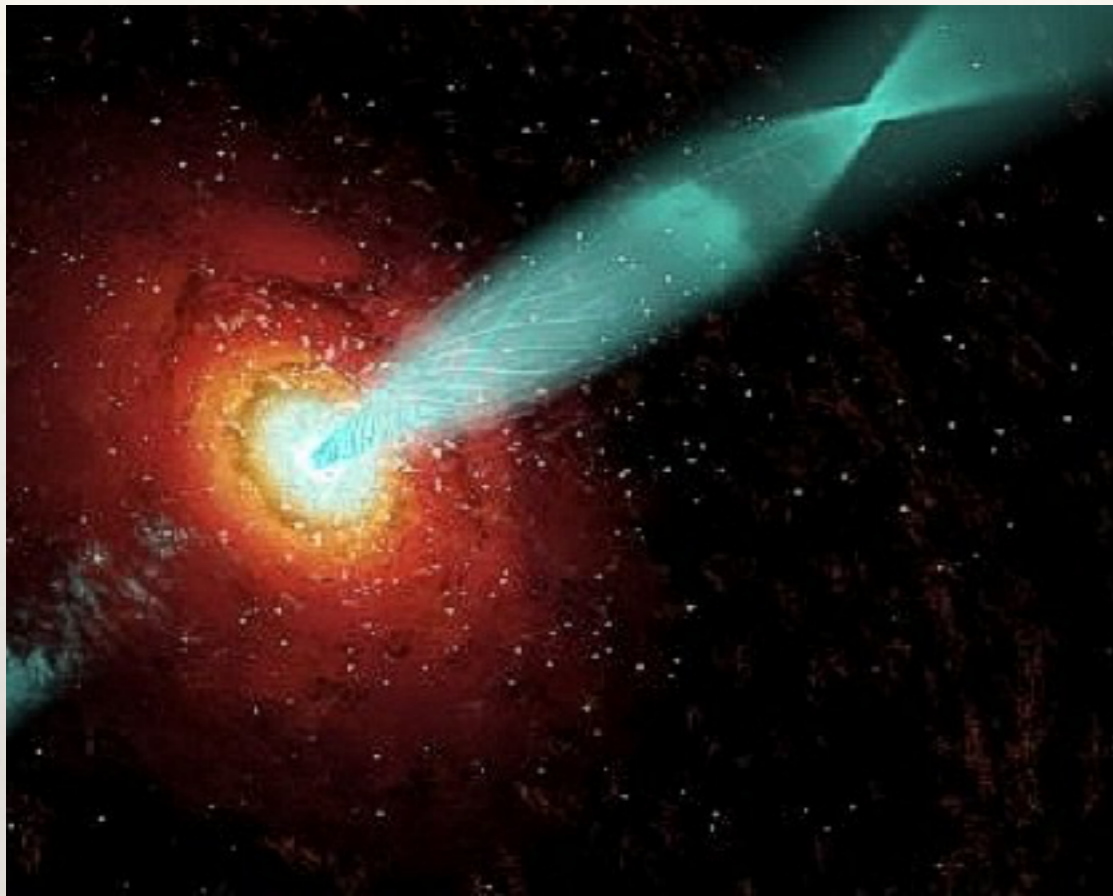


L'instrument LAT à bord du satellite Fermi détecte au même moment une éruption du blazar TXS0506+056 à 0.1°



Le très grand télescope Cherenkov MAGIC détecte aussi une émission de ce même blazar TXS0506+056 au-dessus de 100 GeV

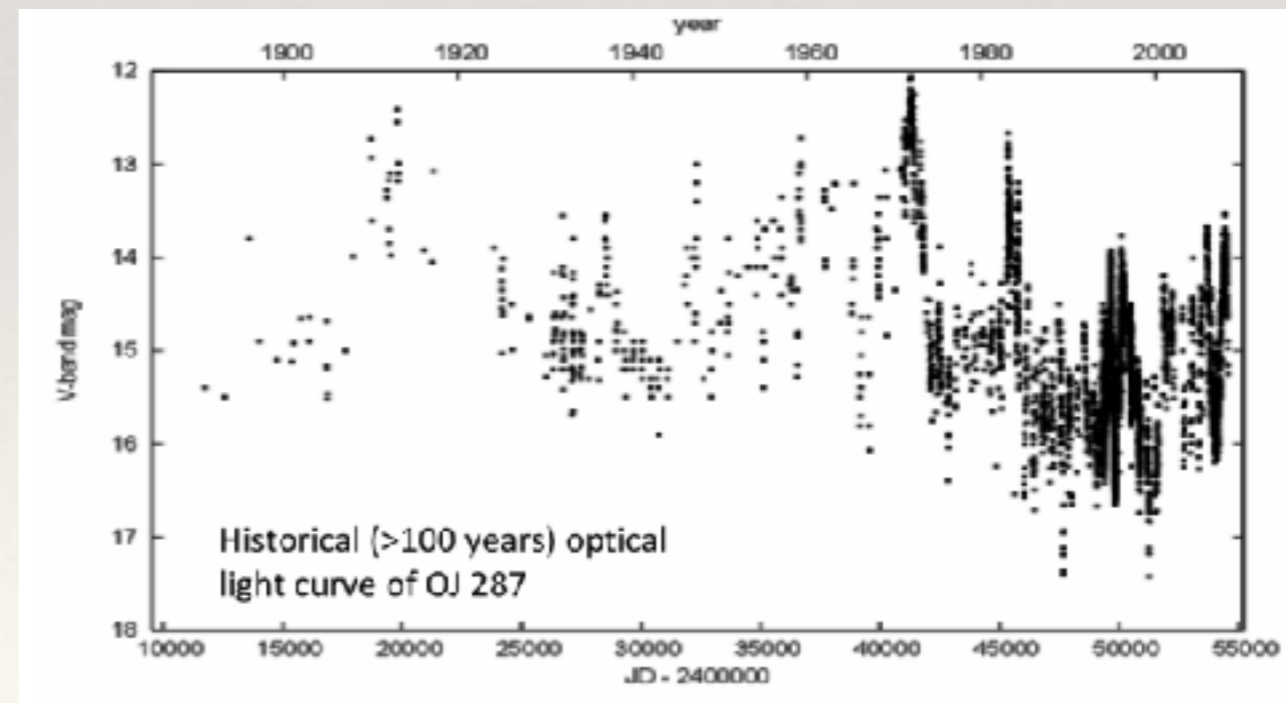
Blazar TXS 0506+056



Qu'est ce qu'un blazar ?

- C'est un **monstre de l'Univers** (source astrophysique parmi les plus violentes de l'Univers)
- Associée à un **trou noir super massif** (million-milliard de Msun) situé au centre d'un noyau actif de galaxie, souvent à des distances très éloignées

- **Objet très lumineux et variable** dans le temps avec des périodes éruptives de plusieurs mois
- Source produisant des **jets relativistes** pointant vers nous (boost dopler) autour d'un disque d'accretion



Suivi multi-longueurs d'onde de TXS 0506+056

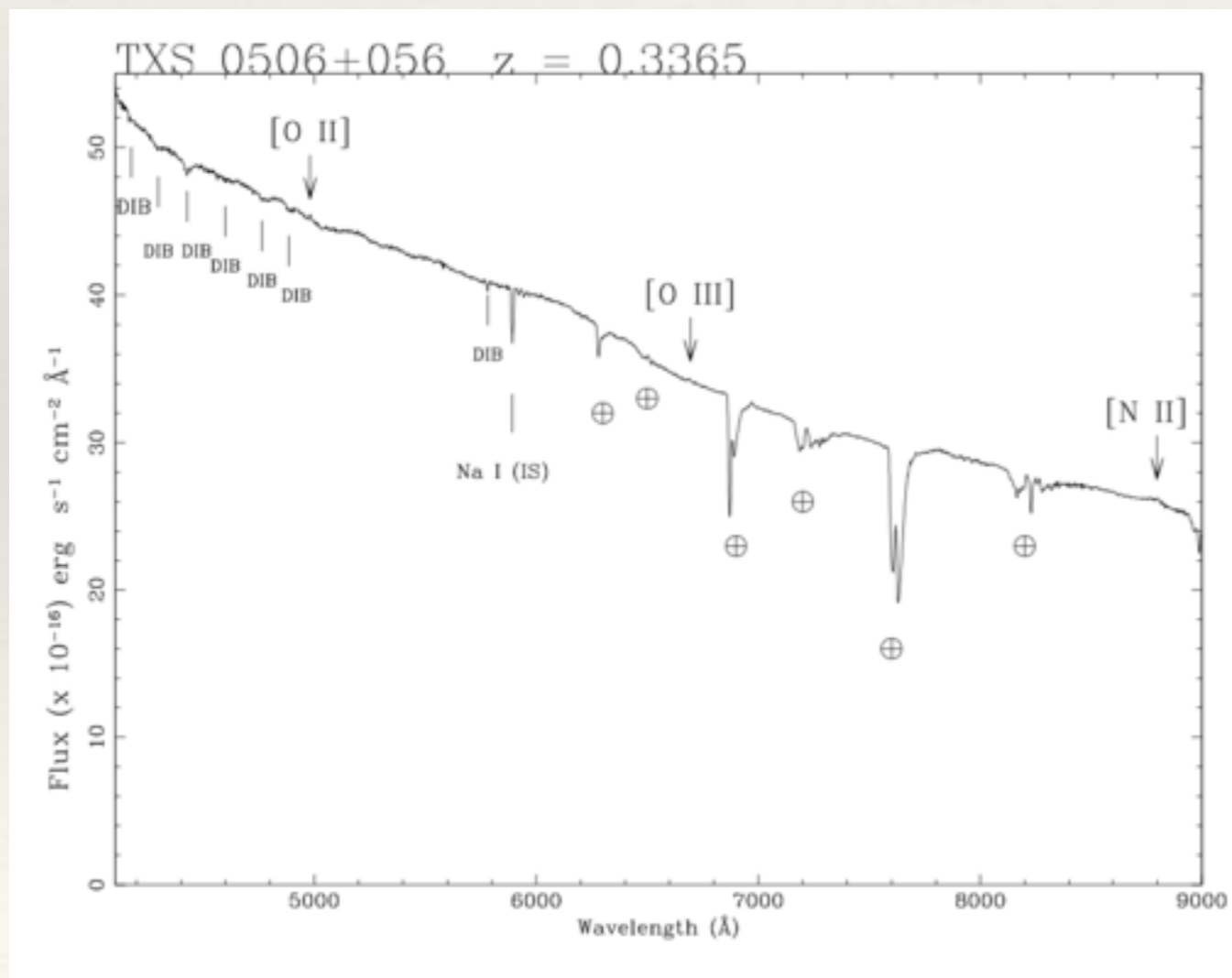
Cette annonce a déclenché un suivi multi-longueurs d'onde



Distance de TXS 0506+056

La question clef: est ce que cette association est fortuite ou bien réelle ?

- Eruption a duré ~6 mois, association a 0.1°
- Probabilité: 3 sigma (99.73 % de chance que ce ne soit pas fortuite)
- Un ingrédient manquant: la distance de la source



Spectroscopie avec l'instrument OSIRIS sur le télescope GTC (10.4m) aux Canaries
⇒ $z = 0.3365$ (1.57 Gpc ou 5.7 milliards d'années lumière)
⇒ C'est une source assez proche, donc très intense

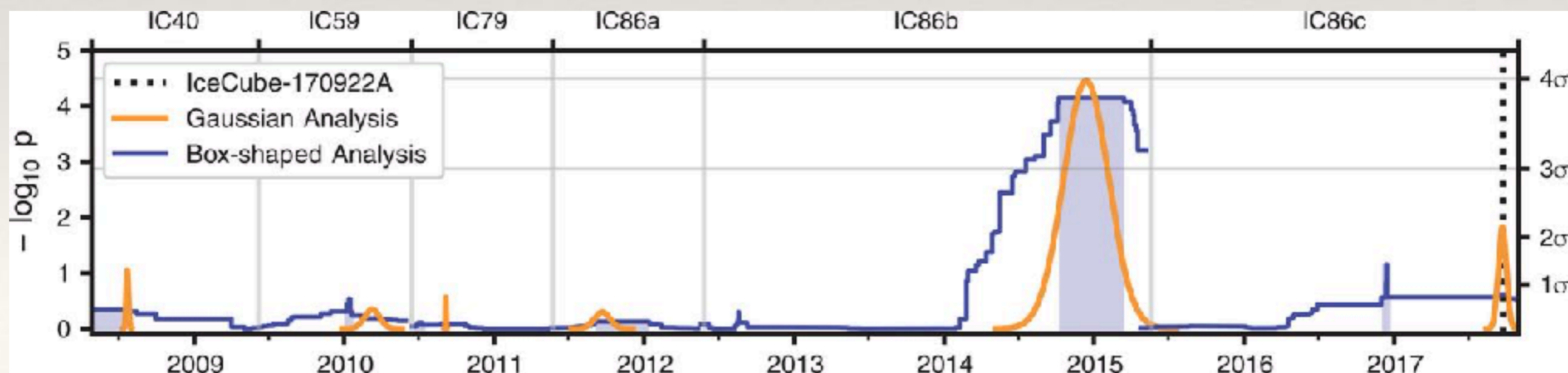
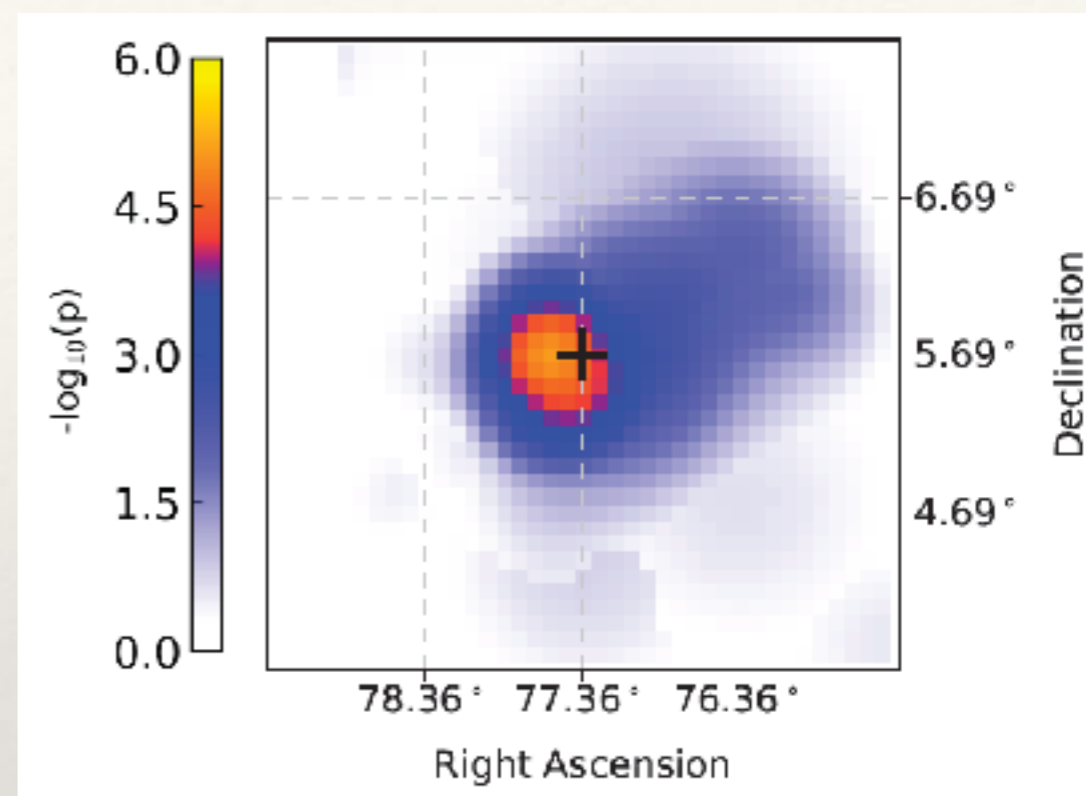
Beaucoup de neutrinos de TXS 0506+056

Difficile de dire plus sur un seul événement !

IceCube a regardé dans ces données archive

→ Un signal de 19 événements a été identifié alors qu'on attendait 6 événements de bruit de fond, répartis dans une période de 150 jours entre 2014-2015.

→ Probabilité: 3.5 sigma (99.99% signal)

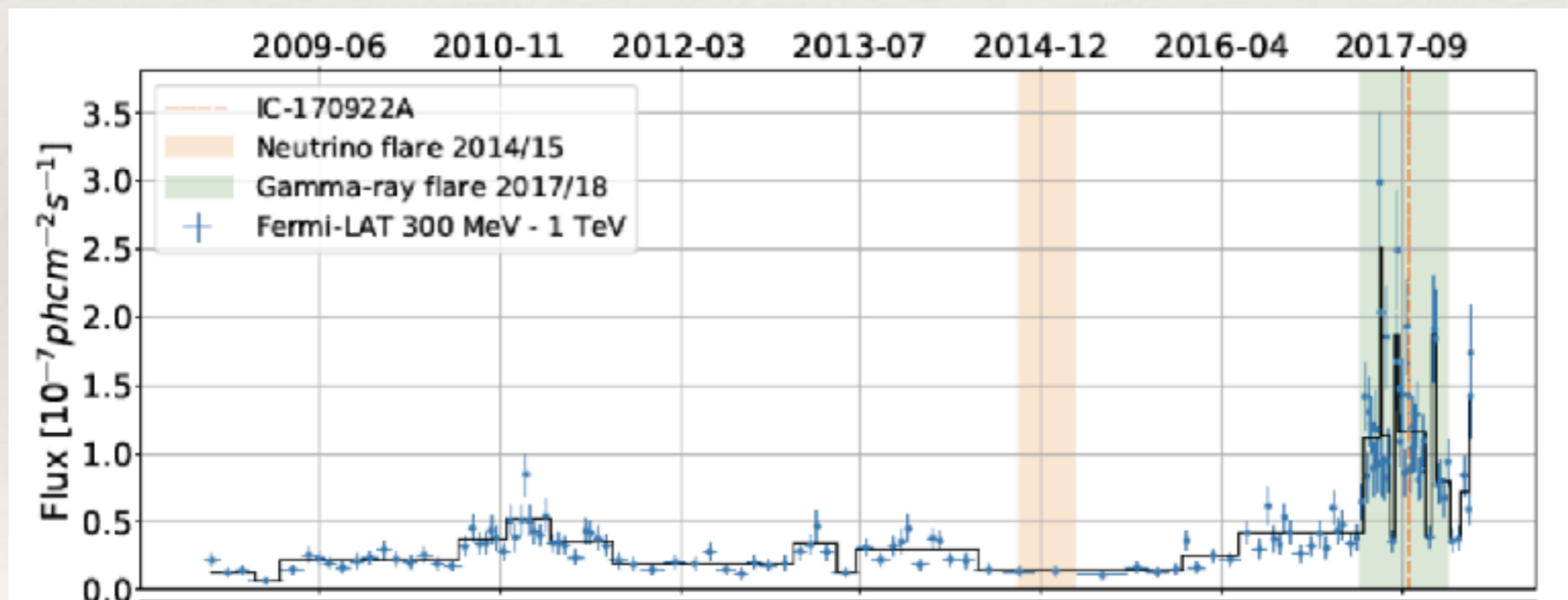


Beaucoup de neutrinos de TXS 0506+056 mais...

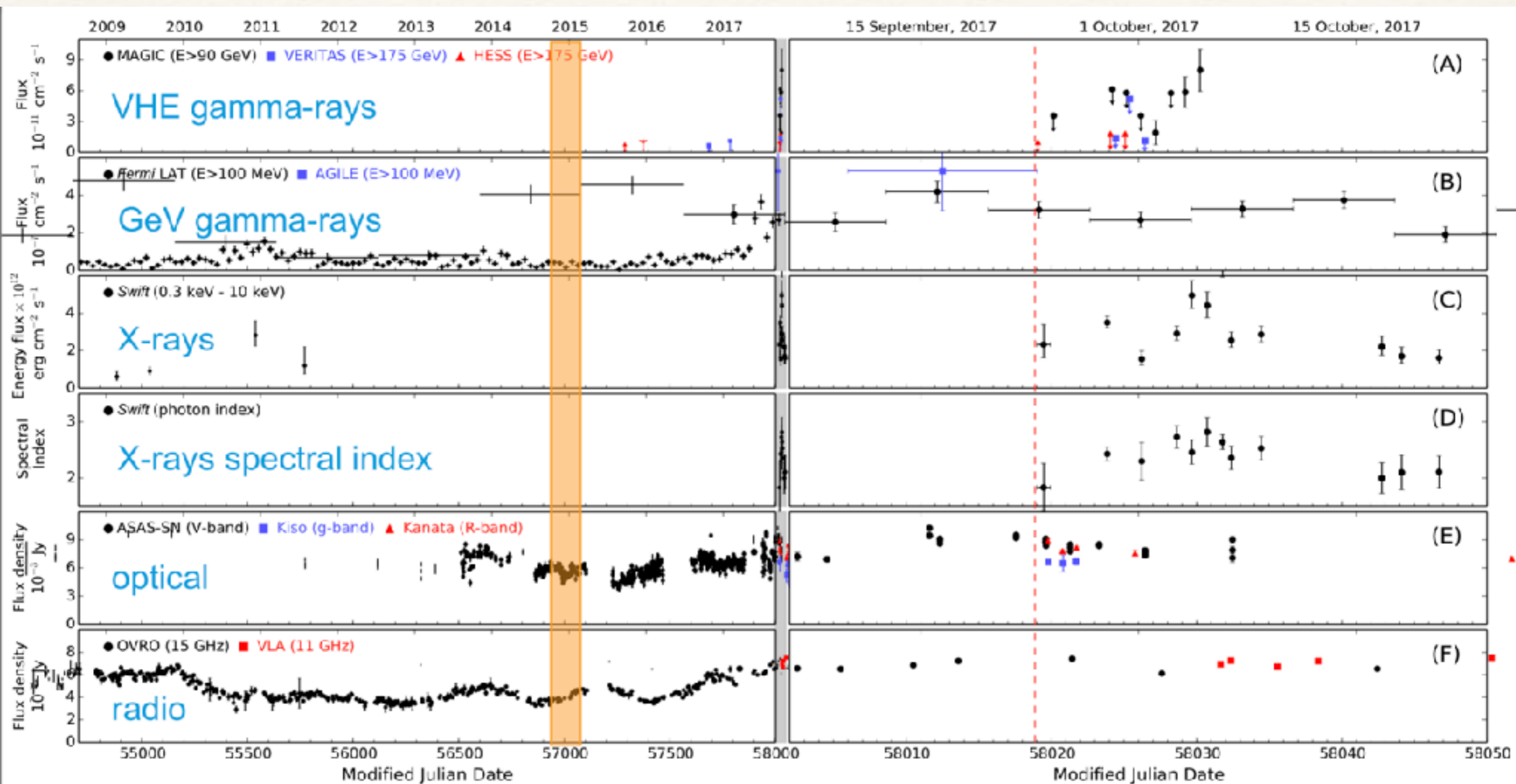
Enormément de neutrinos, c'est cool mais aucune activité en rayon gamma n'a été détectée par Fermi pendant le burst de neutrino en 2014-2015 (pas ou très peu de données d'archive)

⇒ flare orpheline

⇒ Très difficile de modéliser la source avec un modèle qui reproduise les 2 événements.



Suivi multi-longueurs d'onde de TXS 0506+056

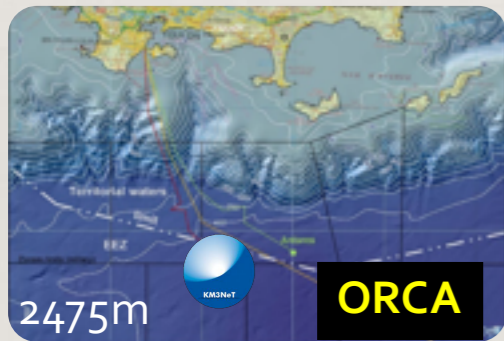


Projet futur: KM3NeT

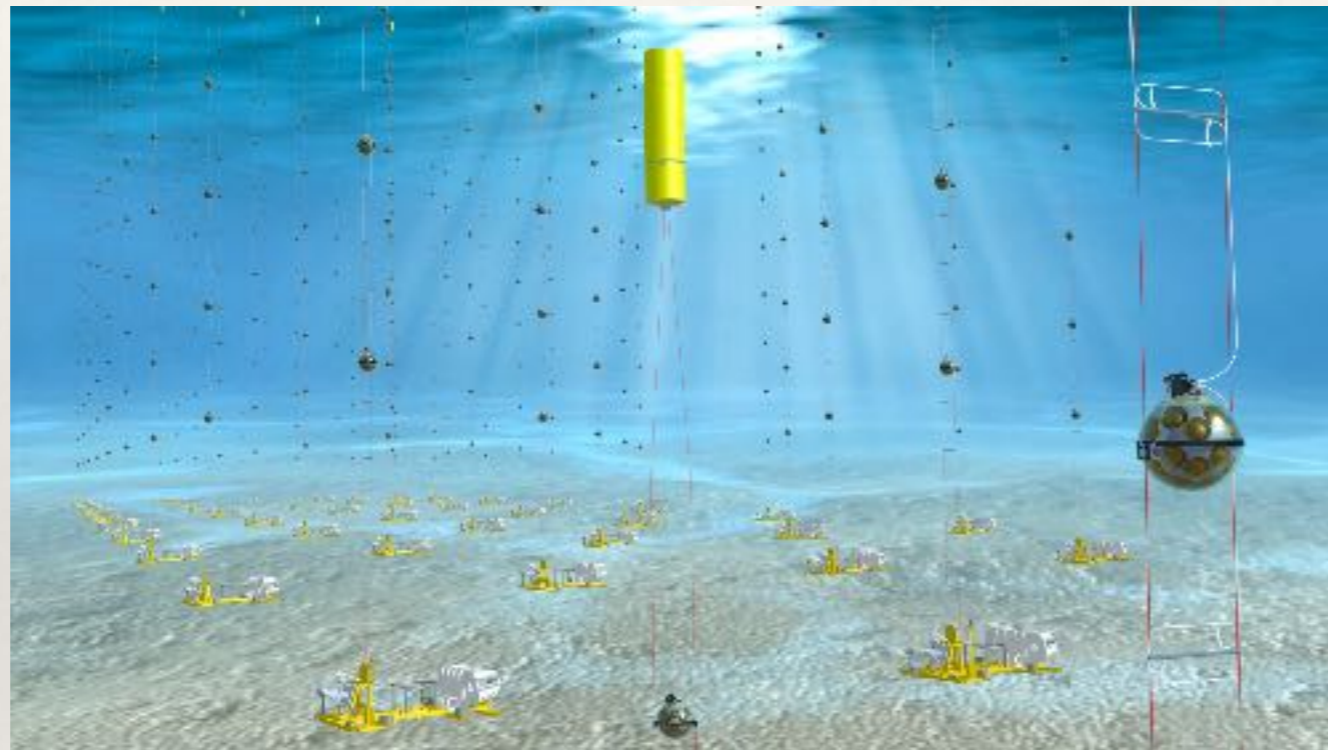
ANTARES, dont le CPPM est le labo hôte, est un détecteur de neutrino situé à 2500m de fond au large de Porquerolles (2007-2020) qui a enregistré ~15000 neutrinos depuis.

Oscillation
Research
with Cosmics
In the Abyss

ORCA: au large
Toulon, France

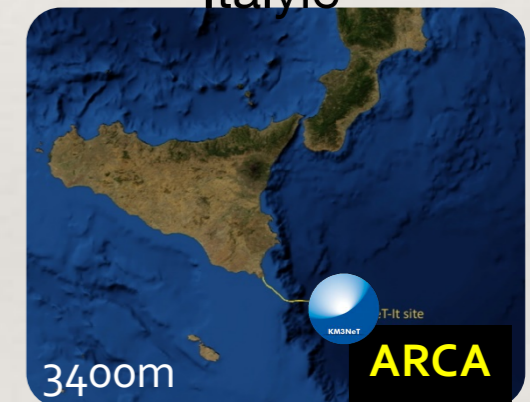


115 lignes de 18 DOMs (L~20m, H~9m)



Astroparticle
Research
with Cosmics
In the Abyss

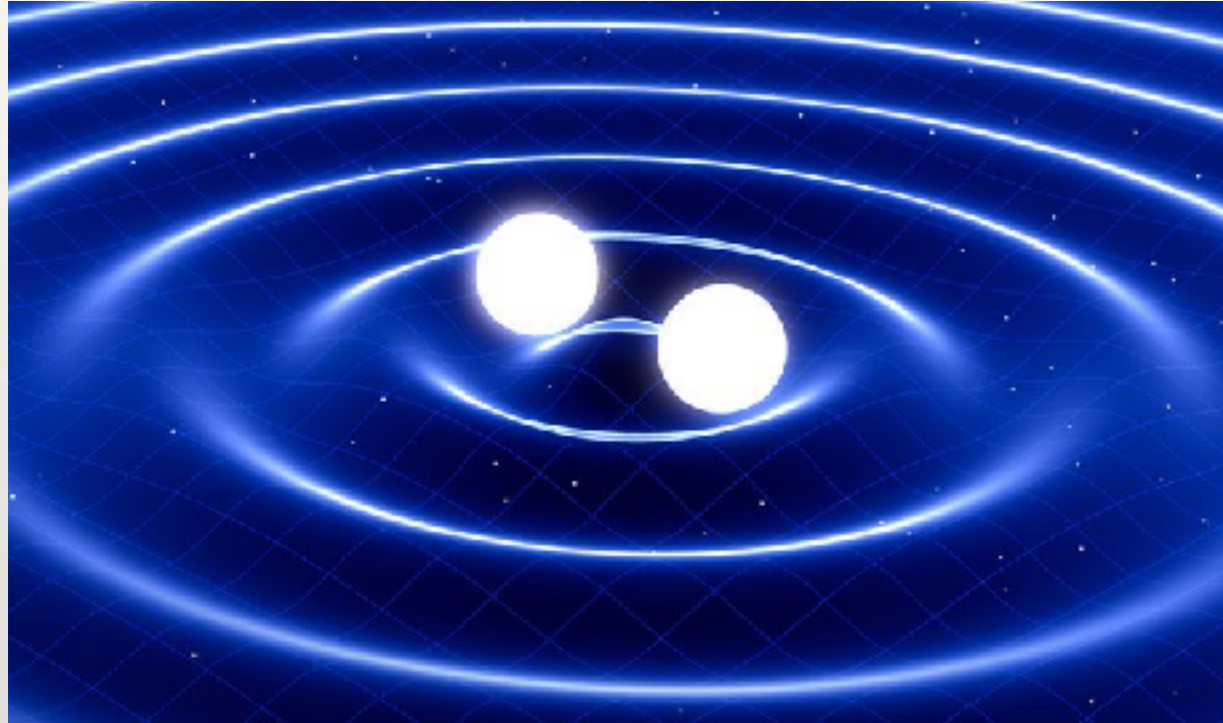
ARCA: au large
Capo Passero,
Italyie



230 lignes de 18 DOMs (L~90m, H~36m)

KM3NeT est un détecteur de neutrino réparti sur 2 sites: un au large de Toulon (**ORCA**) et un au large de la Sicile (**ARCA**) avec pour objectif de surpasser les performances d'ANTARES (x10-20) sur toutes la gamme en énergie en nombre de neutrinos et en précision. Sa construction a commencé et on commence déjà à détecter des neutrinos.

Le nouveau messenger à la mode: les ondes gravitationnelles

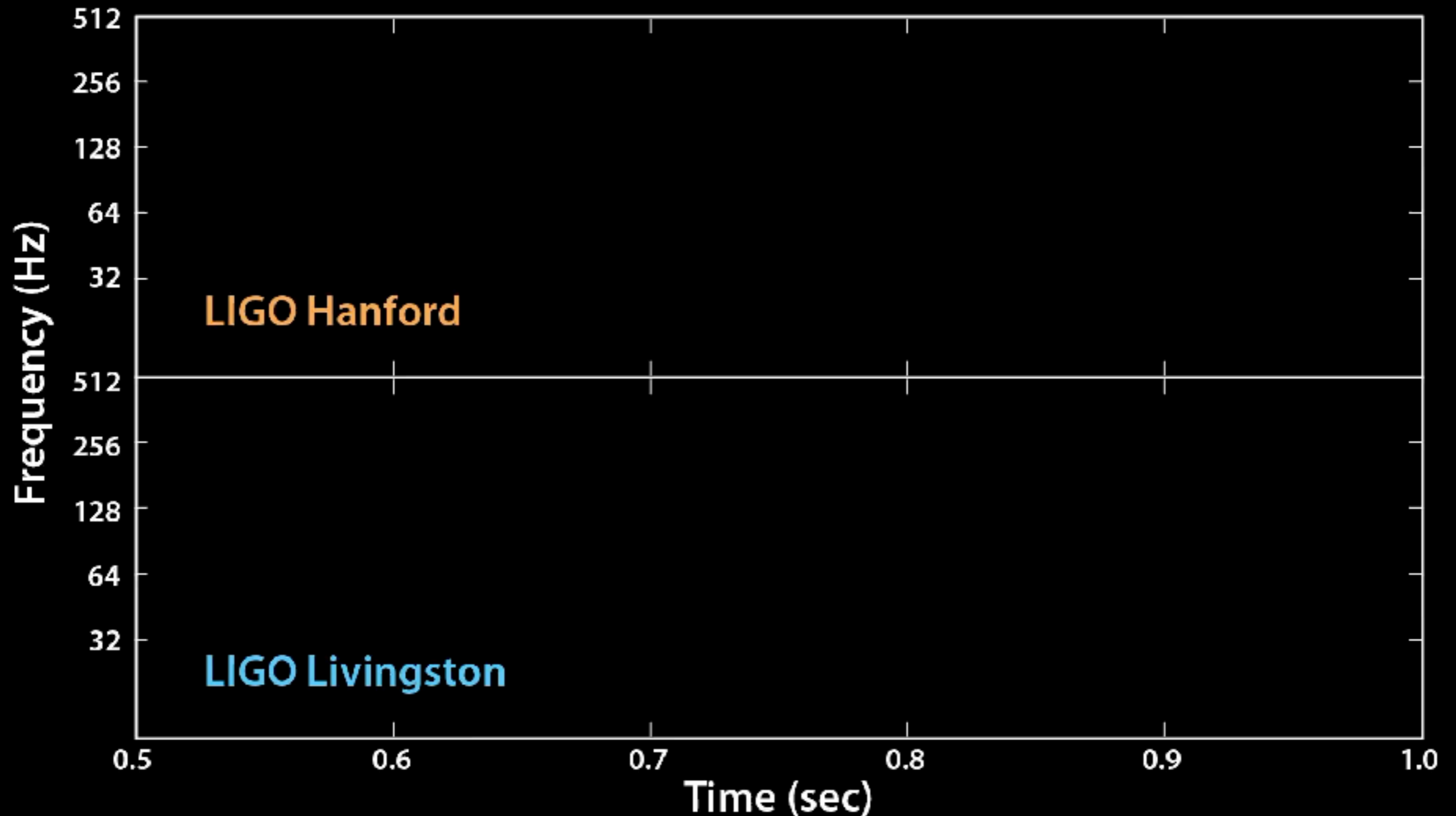


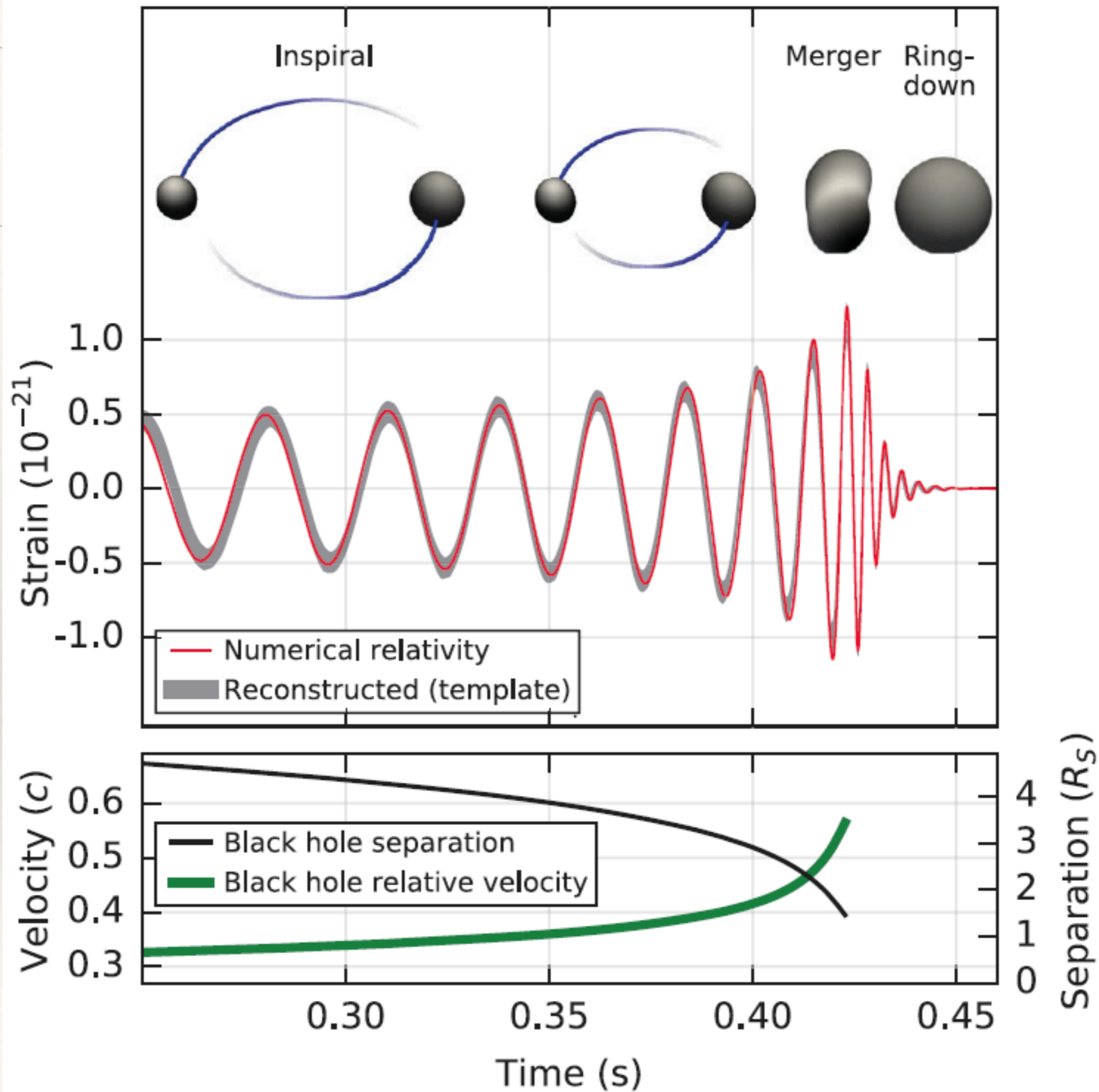
Une onde gravitationnelle est une déformation de la courbure de l'espace-temps. Cette onde se propage sur des grandes distances à la vitesse de la lumière.
→ Prédite par Einstein en 1916 par la théorie de la relativité générale lors d'accélération violente des masses.



→ Détectée pour la 1ère fois en 2015 par l'interféromètre LIGO aux US lors de la coalescence de deux trous noirs.
→ 3 interféromètres (2 LIGO aux US + VIRGO en Italie)

GW150914: fusion de 2 trous noirs

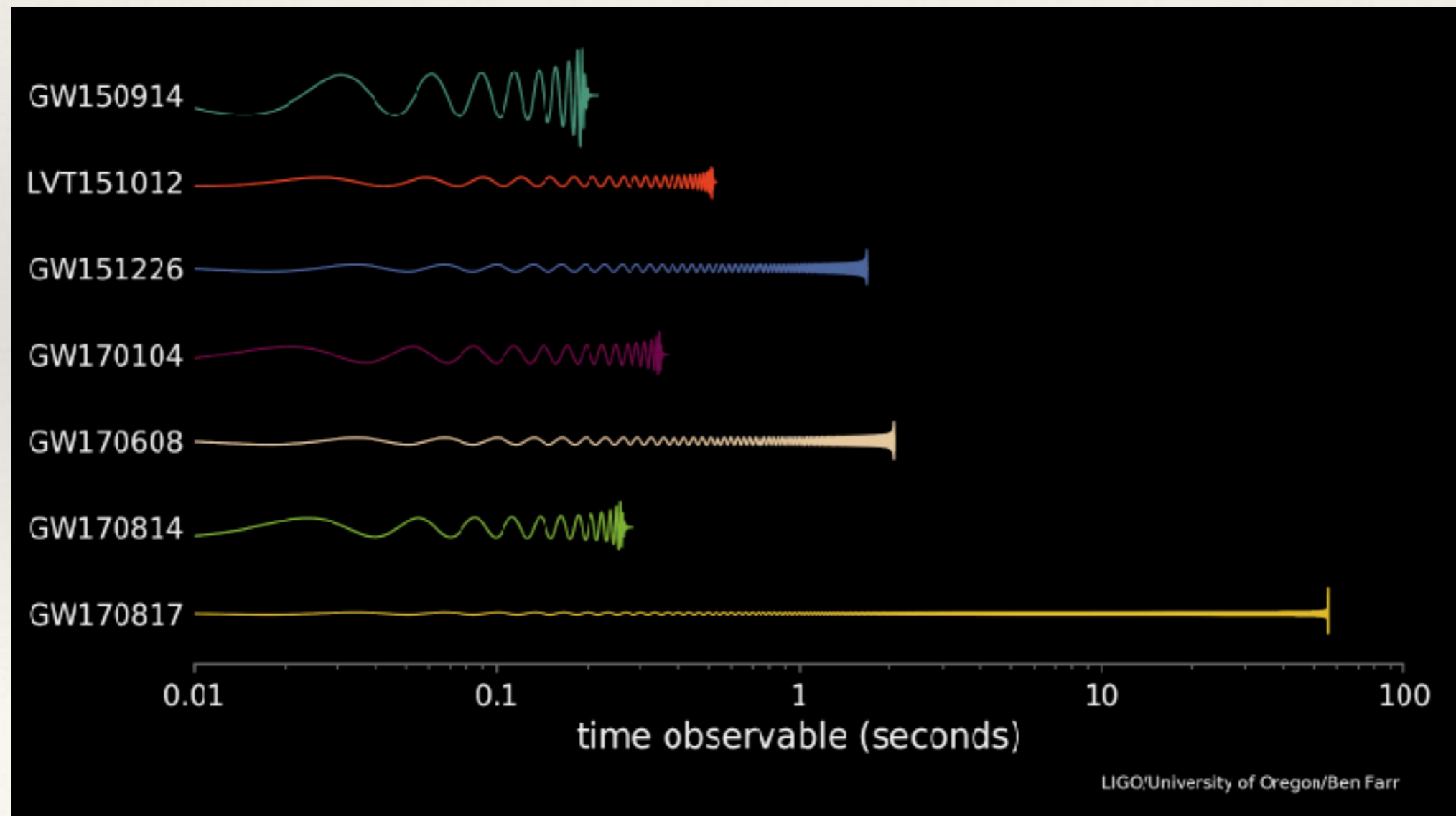




Des ondes gravitationnelles par dizaines

Depuis 2015, une cinquantaine de coalescence d'objets compacts a été détectés, quasiment tous des mergers de trous noirs et 1-4 fusions d'étoiles à neutron et peut être une fusion d'un trou noir avec une étoile à neutron \implies Une très grande diversité

\implies Mais une seule onde gravitationnelle a pu être suivie en multi-messager: GW170817

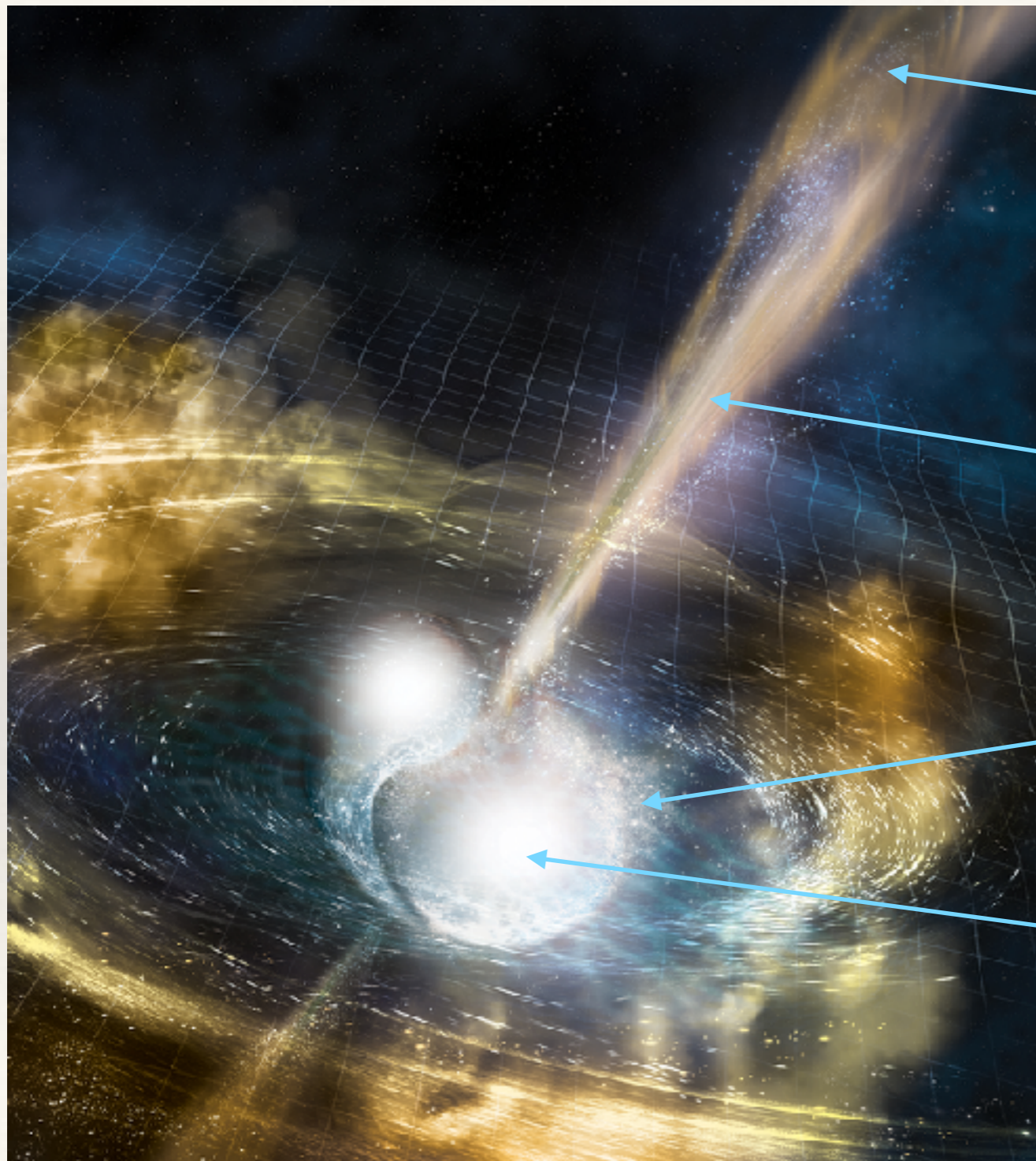


GW170817

Le 17 août 2017 à 12h41'04 (UTC), LIGO/VIRGO ont détecté un événement extra-ordinaire:
une fusion de deux étoiles à neutron à une distance de ~ 40 Mpc



GW170817: détection



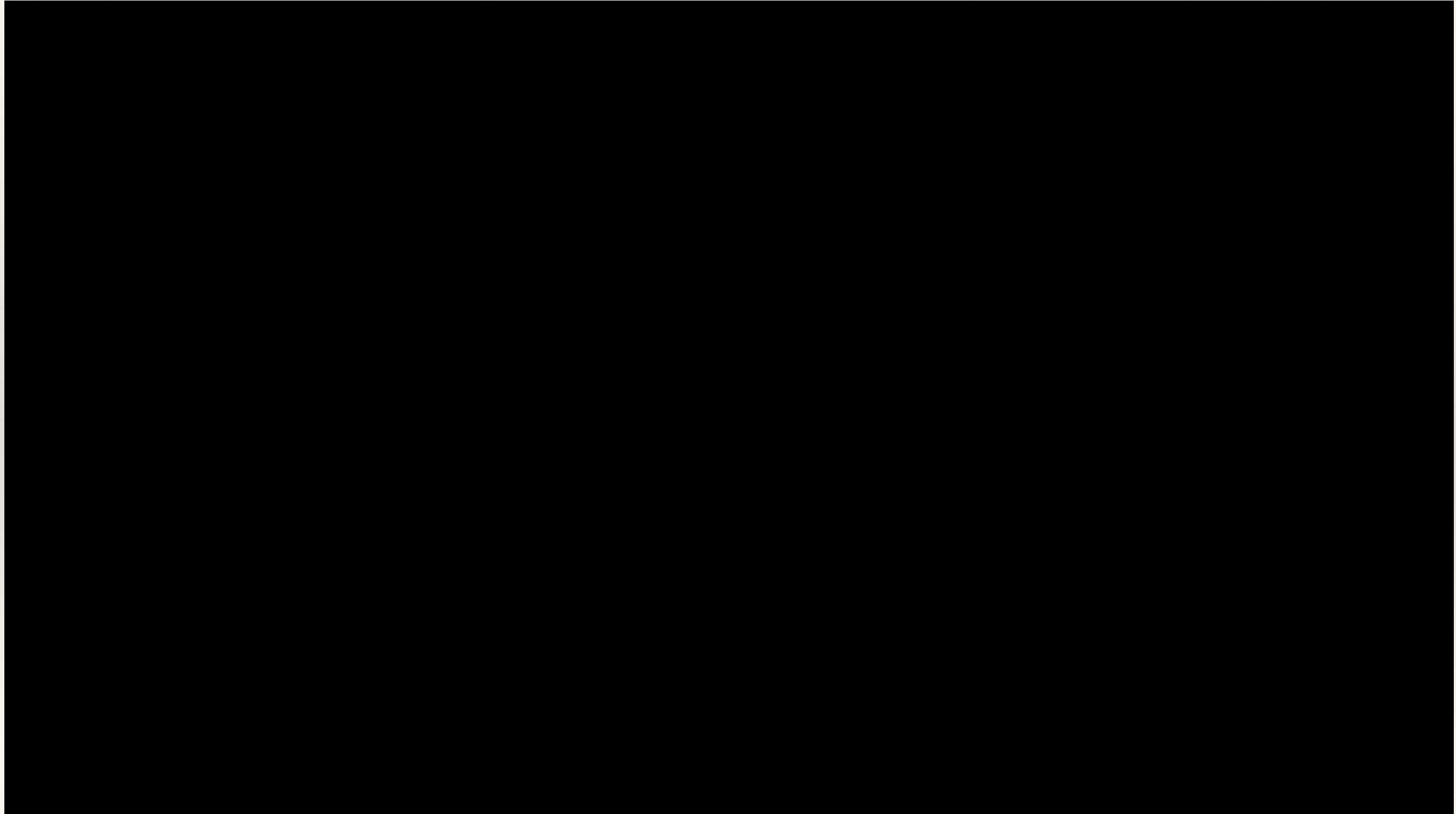
Une rémanence du sursaut gamma

Un sursaut gamma

Une kilonova

Une onde gravitationnelle

Fusion de 2 étoiles à neutron

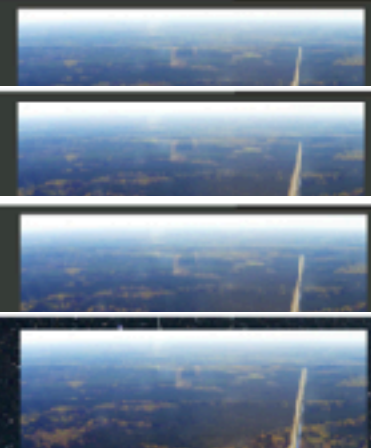




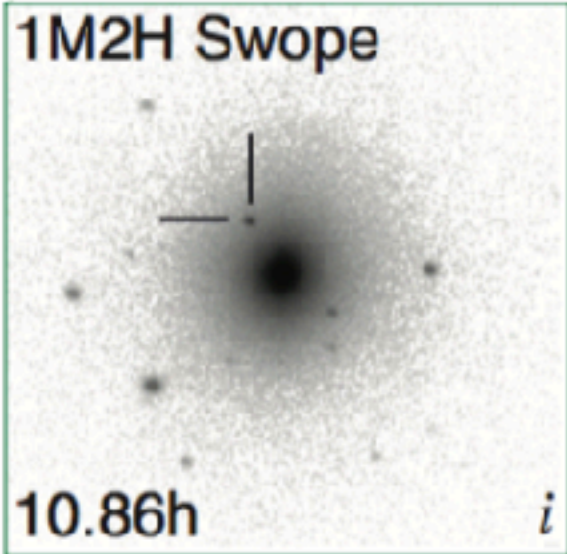
12:41:04 UTC

12:41:06 UTC

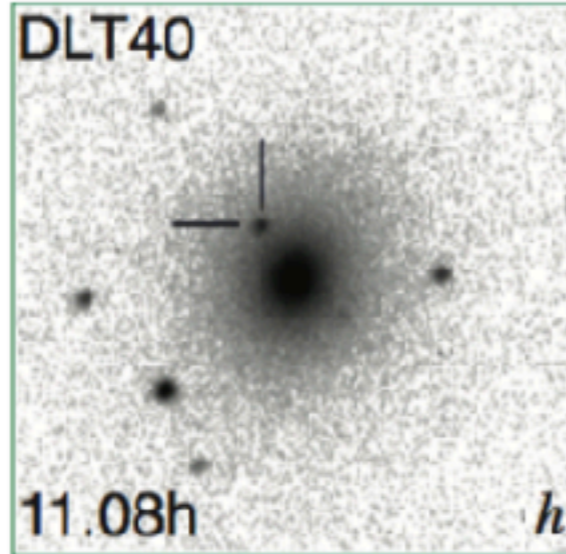
17:54:51 UTC



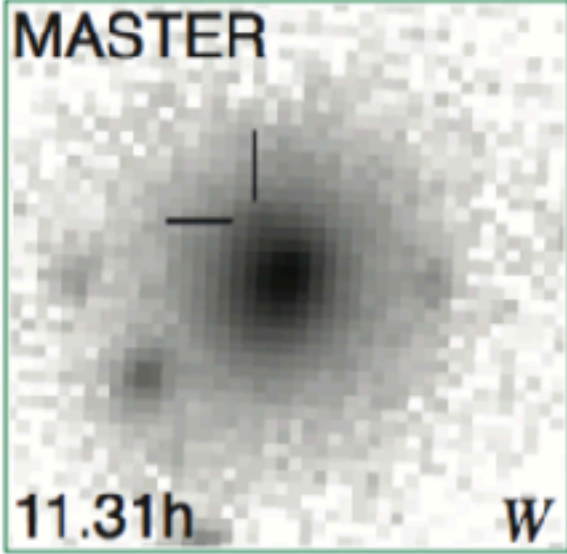
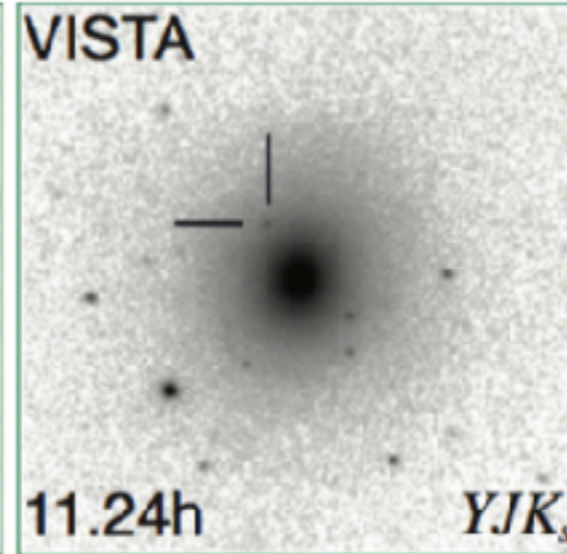
Coulter et al. (2017)



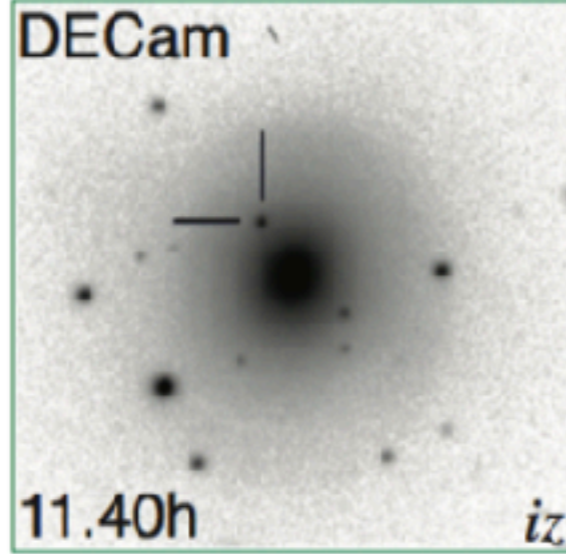
Valenti et al. (2017)



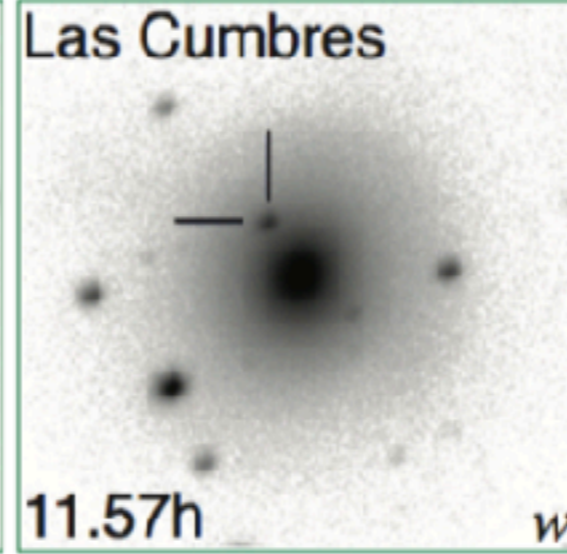
Tanvir et al. (2017)



Lipunov et al. (2017)



Allam et al. (2017)



Arcavi et al. (2017)



GW170817 - GRB170817

Détection pour la 1ère fois d'une contrepartie électromagnétique d'une onde gravitationnelle: un sursaut gamma court est détecté ~1.7s après l'OG

Caractéristiques GRB:

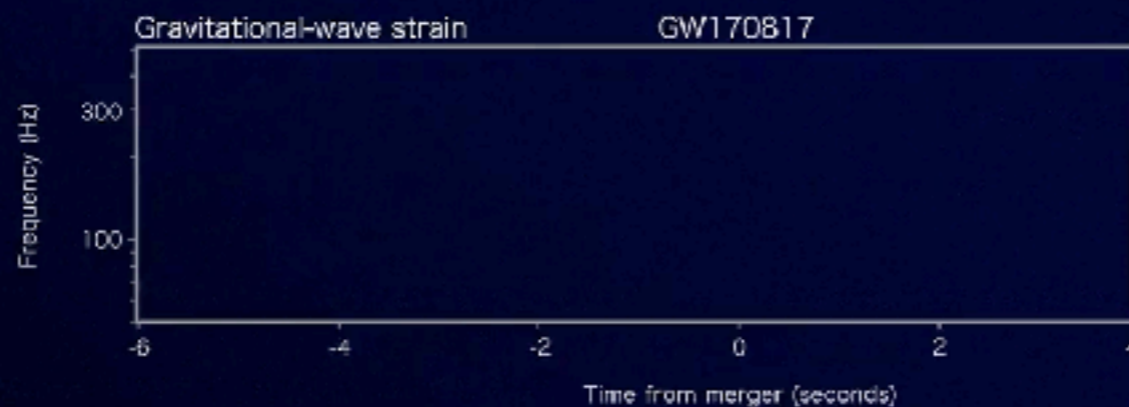
- Sursaut court: 1.5s
- Vue sous un angle $\sim 25^\circ$
- Sous-lumineux (10^{47} erg/s)

⇒ Très atypique

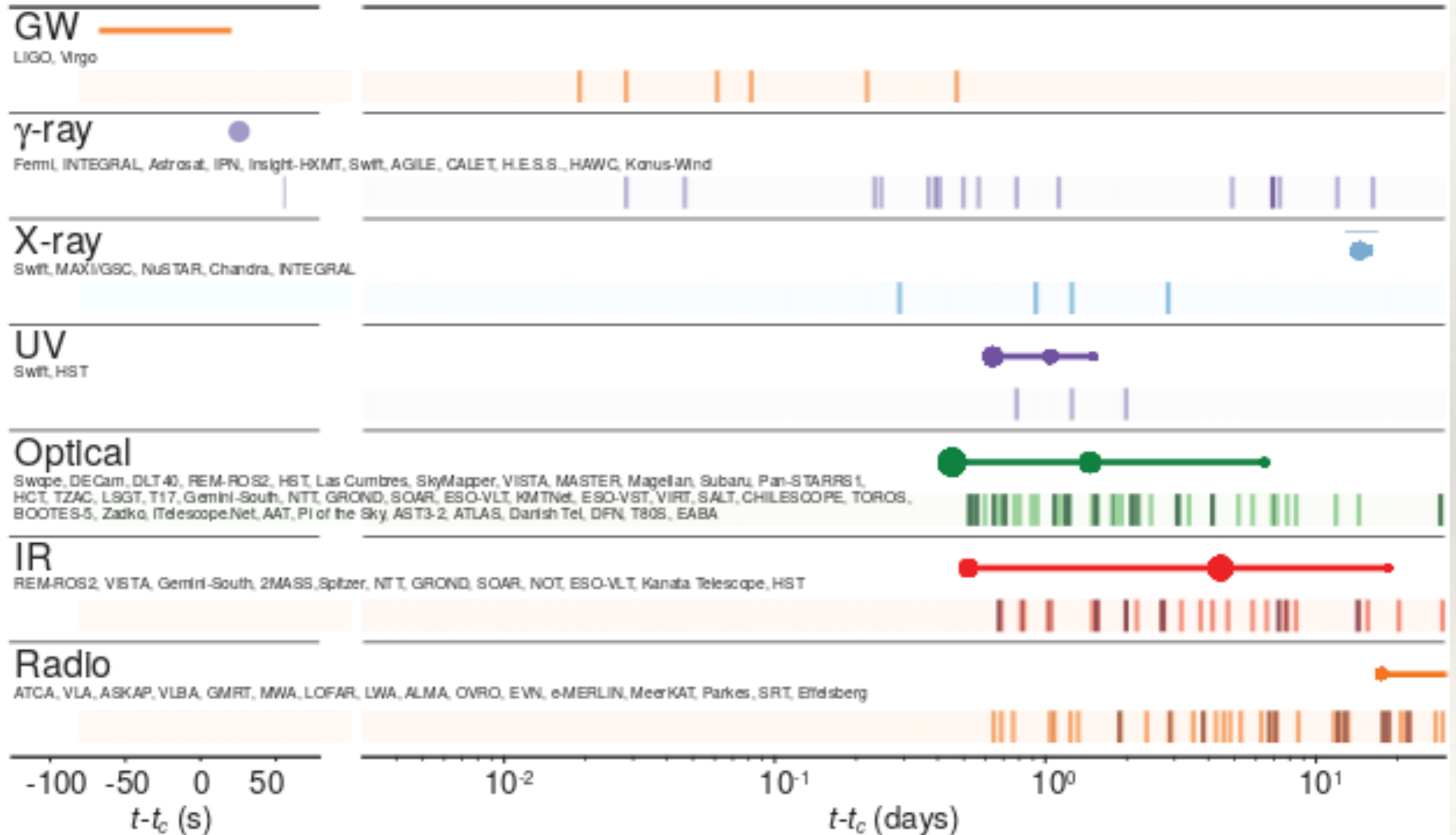
Fermi



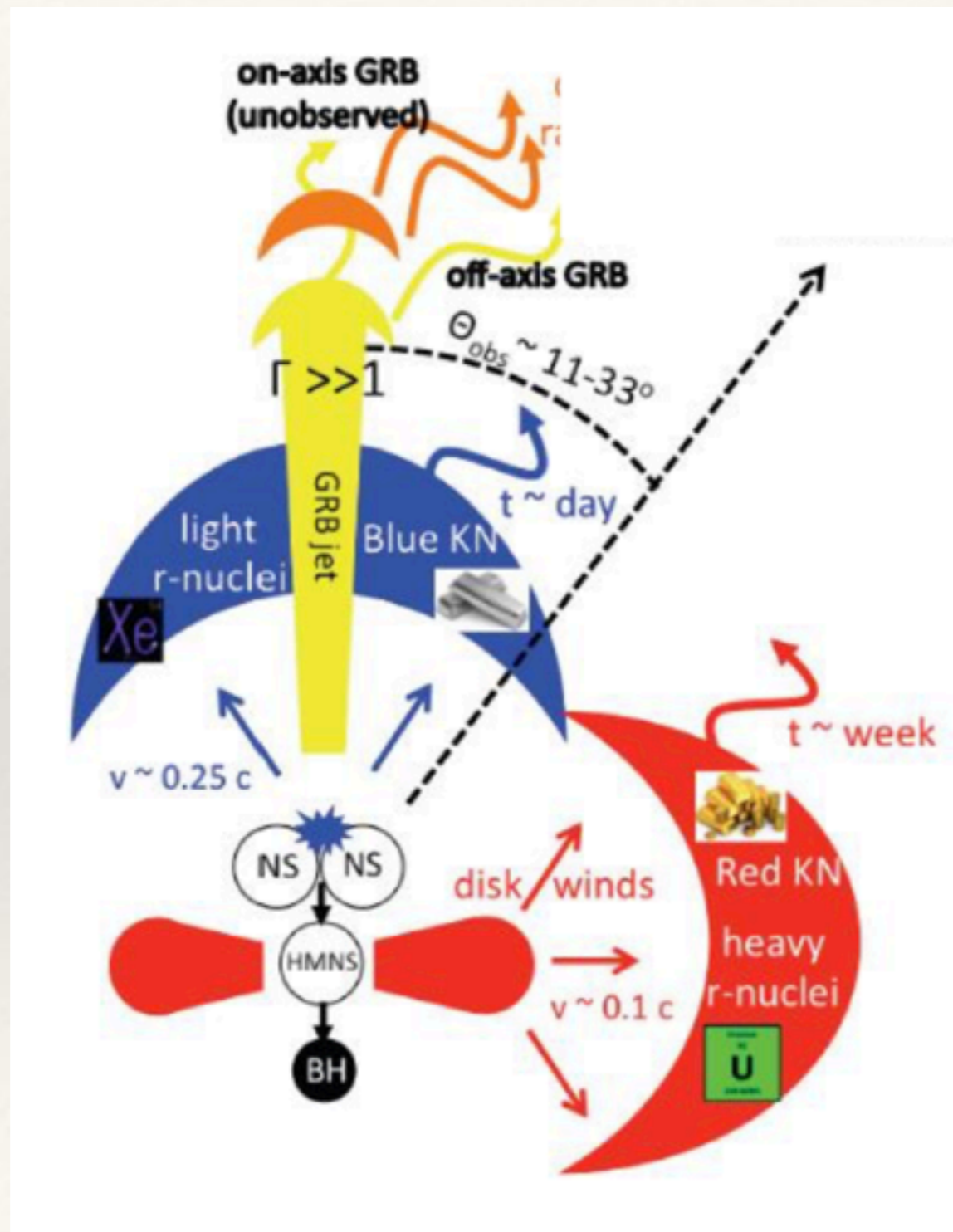
LIGO



GW170817: un suivi spectaculaire

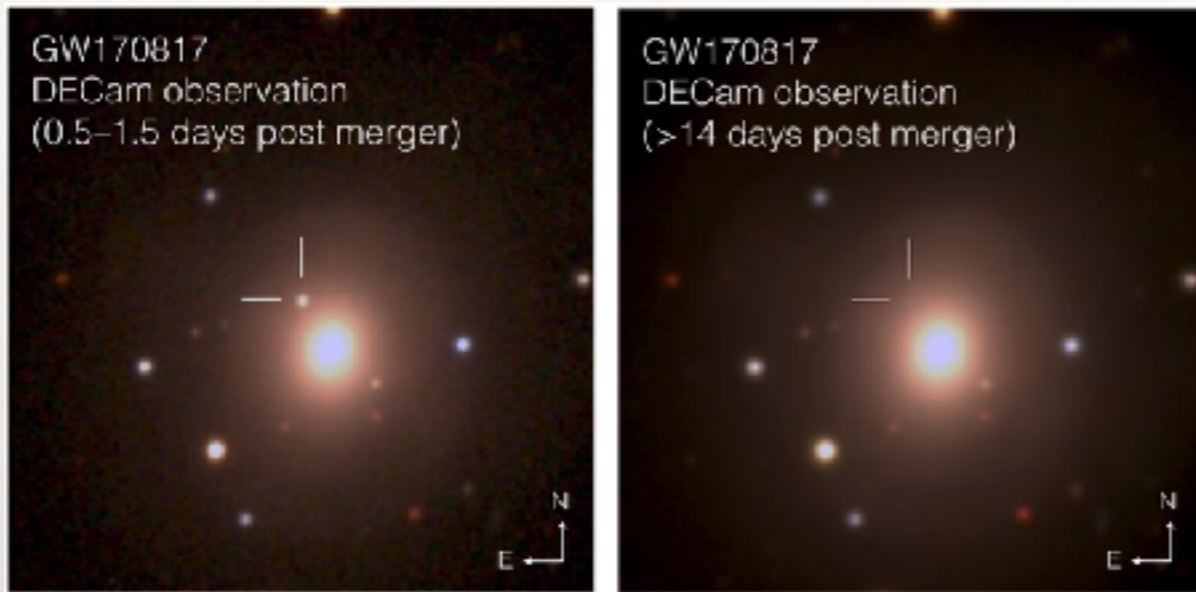


Modèle global pour GW170817



Un exemple de modèle unifié pour expliquer GW170817 (Metzger et al 2017)

AT2017gfo: kilonovae



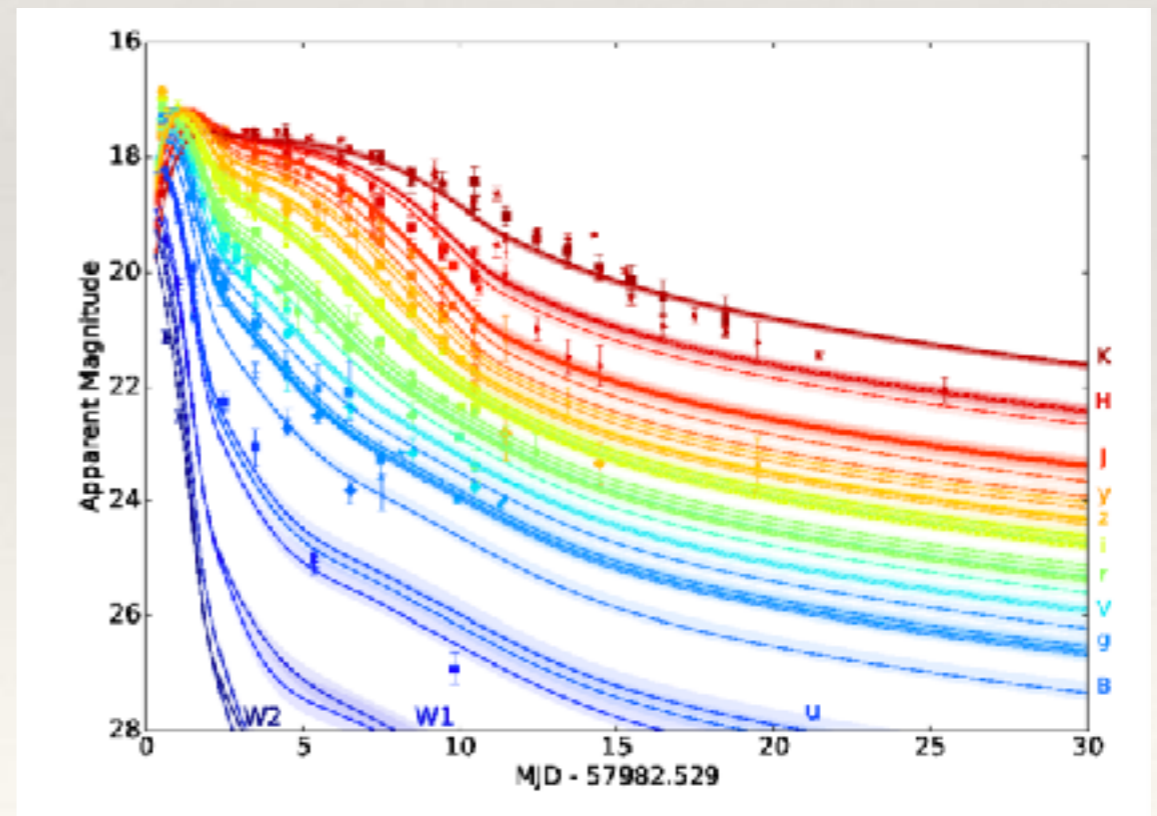
Qu'est ce qu'une kilonova ?

→ Burst lumineux crée par la désintégration des éléments lourds

→ Ces éléments lourds sont produits par des processus nucléaires de capture rapide de neutrons (r-process). Ceci nécessite une très forte densité de neutrons et une forte température (fusion d'étoiles à neutron, supernova)

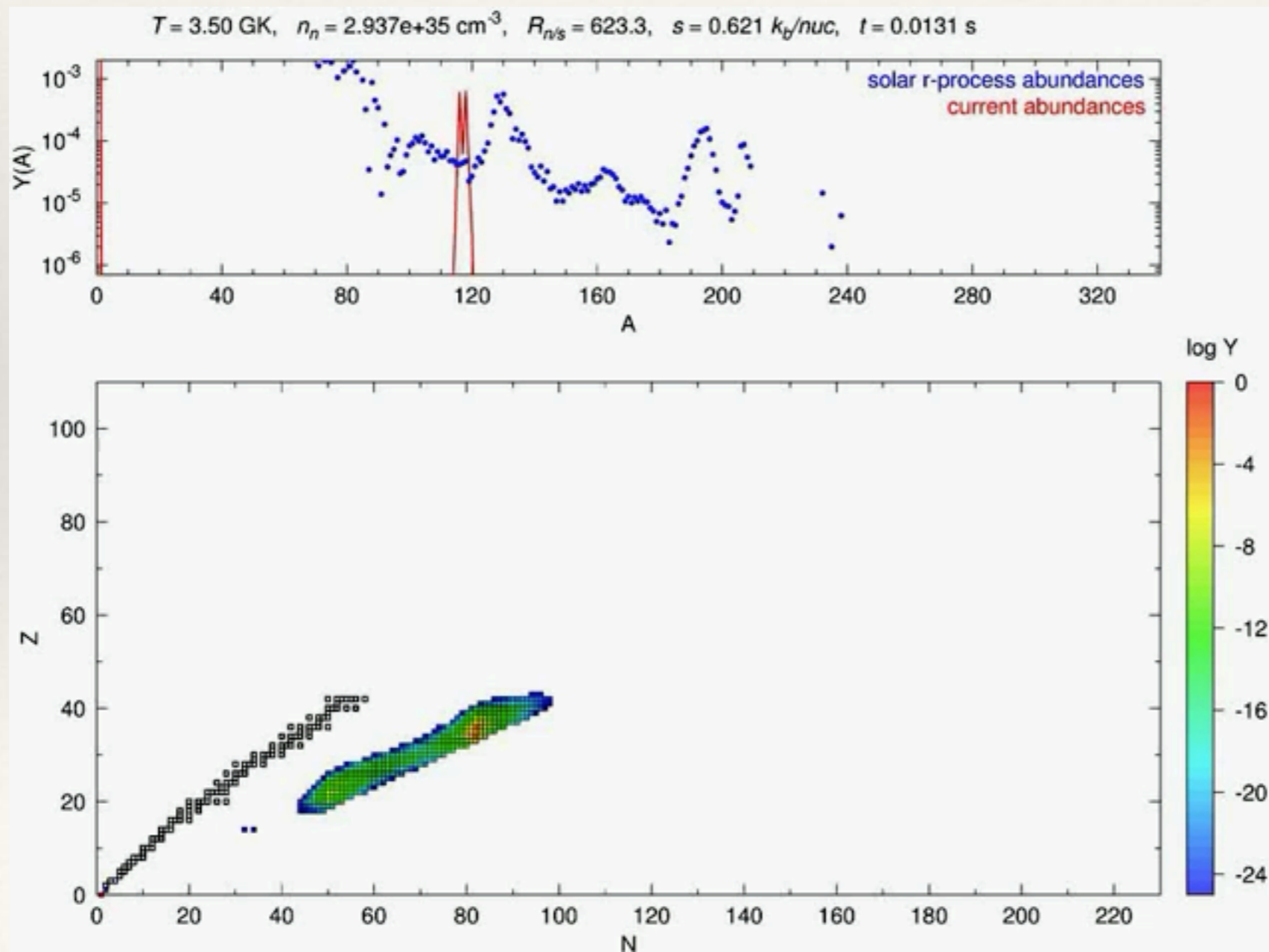
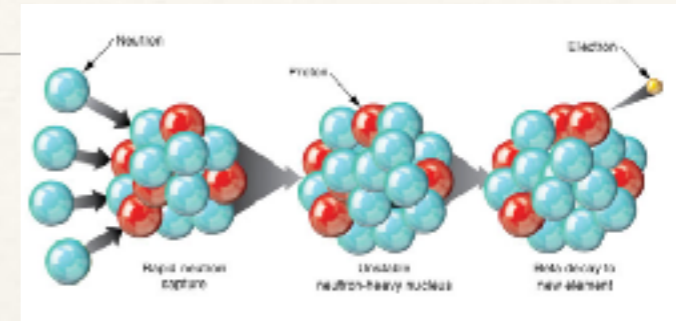
La kilonova a été détectée d'abord par le télescope Swope en Chili puis suivie par un très grand nombre de télescopes optiques de l'UV à l'infrarouge.

→ Transition bleu vers rouge à cause de la présence de plus en plus nombreuses des éléments lourds (lanthanides).



Kilonova: synthèse des éléments lourds

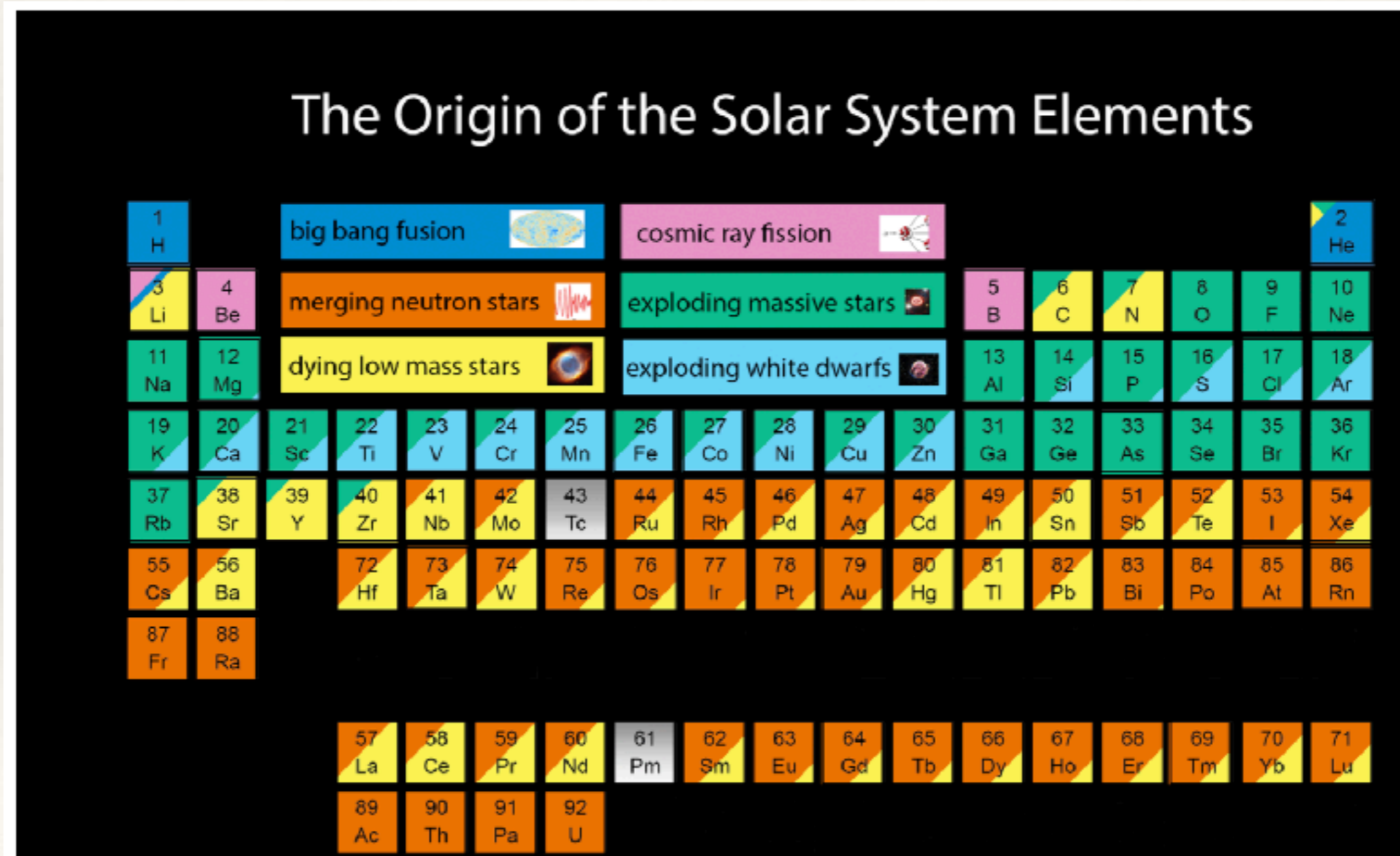
On pense aujourd'hui que la grande majorité des éléments lourds sont produits dans la fusion de 2 étoiles à neutron (par exemple, l'or et le platine...)



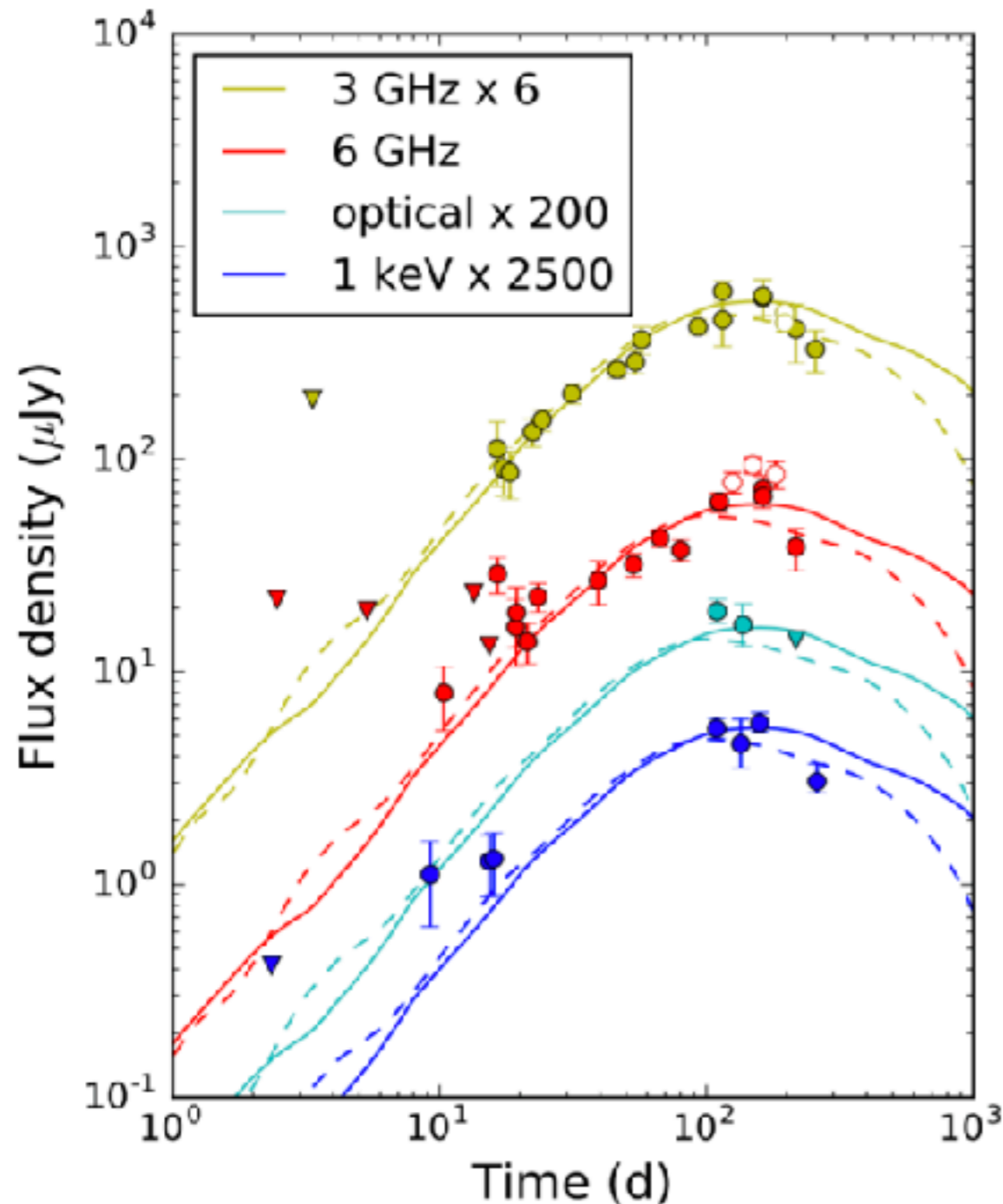
(Martinez-Pinedo)

Kilonova: synthèse des éléments lourds

On pense aujourd'hui que la grande majorité des éléments lourds sont produits dans la fusion de 2 étoiles à neutron (par exemple, l'or et le platine...)



GRB 170817: rémanence du GRB



→ Lorsque le jet du sursaut entre en collision avec le milieu interstellaire, il se produit un rayonnement électromagnétique qu'on appelle la rémanence.

→ Suivant la brillance du sursaut, elle peut être suivie pendant plusieurs mois, années.

→ Son étude nous renseigne sur la nature du jet, l'environnement immédiat de la source, sur la nature de l'objet post-merger

GW170817: synthèse

GW170817 est un événement exceptionnel de part sa nature et la quantité de données recueillies. On a quasiment une image complète d'un système super complexe:

- Nature du progéniteur avec les ondes gravitationnelles
- Lien clair entre un sursaut gamma court et le merger de 2 étoiles à neutron
- Détection confirmée des kilonovae bleu et rouge pour la 1ere fois (on avait des indices sur 2-3 autres cas)

De nombreuses questions après cet événement:

- Est ce que cet événement est représentatif de la population de sursauts courts ?
- Quelle est la fréquence de ces fusions d'étoiles à neutron?
- Explorer les sursauts gamma avec des angles de vue différents ?
- Lien entre l'accrétion/ejection dans les jets ? Formation des jets ?
- Est ce qu'il y a des rayons cosmiques accélérés et donc des neutrinos ?
- ...

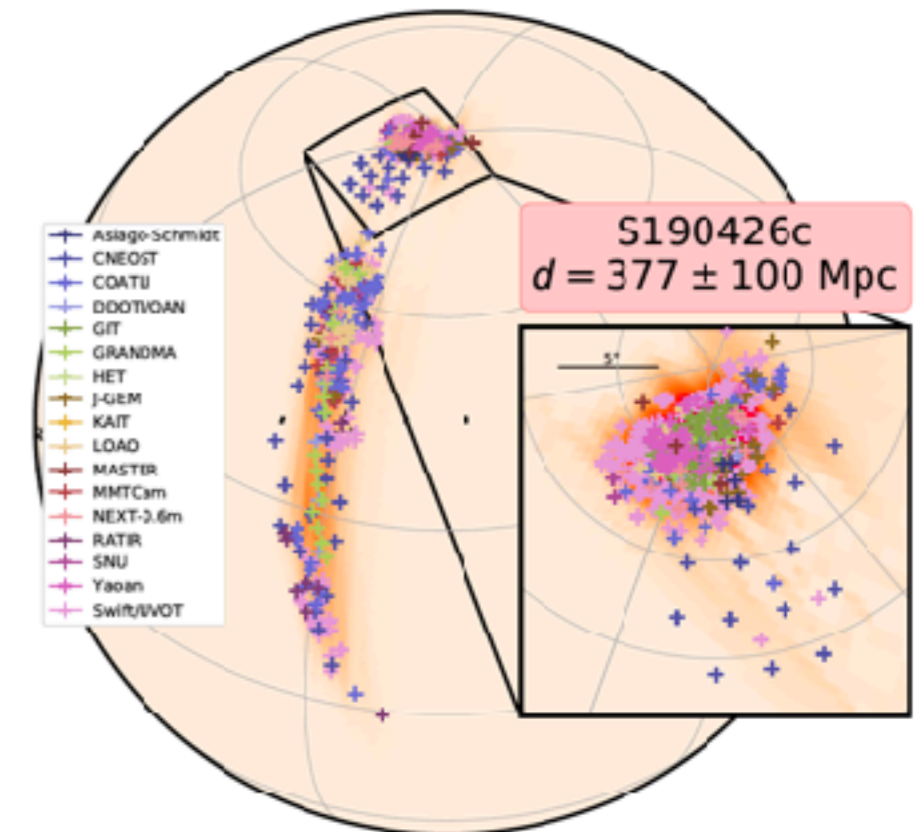
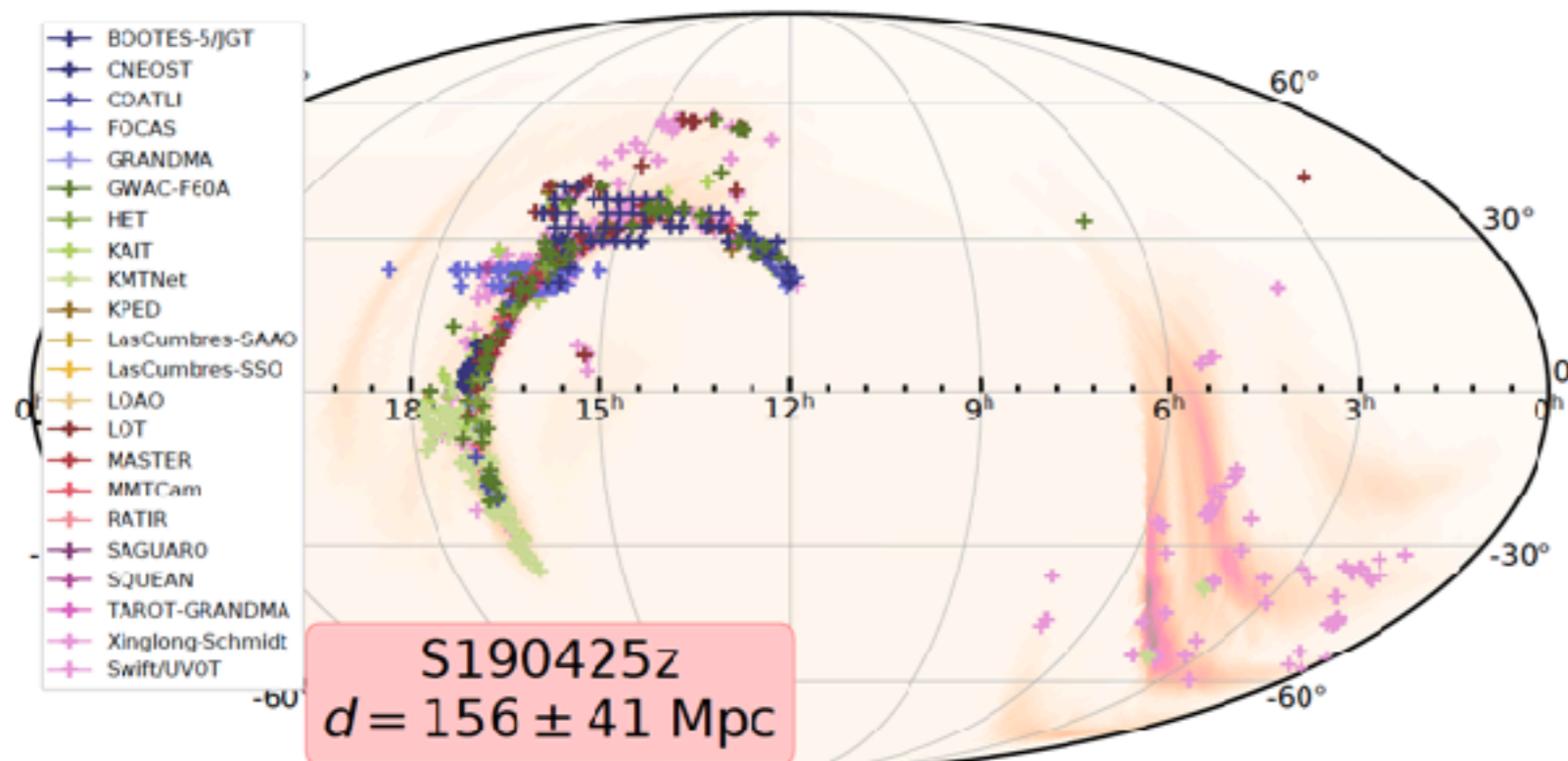
S190425z (NS-NS) et S190426c (NS-BH) ?

Récemment, LIGO/VIRGO a déclenché deux alertes pour des potentielles ondes gravitationnelles:

→ S190425z: potentielle fusion de 2 étoiles à neutron à une distance de ~ 156 Mpc

→ S190426c: potentielle fusion étoile à neutron / trou noir à une distance de ~ 377 Mpc

⇒ Malgré un intense suivi, pas de contrepartie. C'est un jeu extrêmement difficile...



Résumé

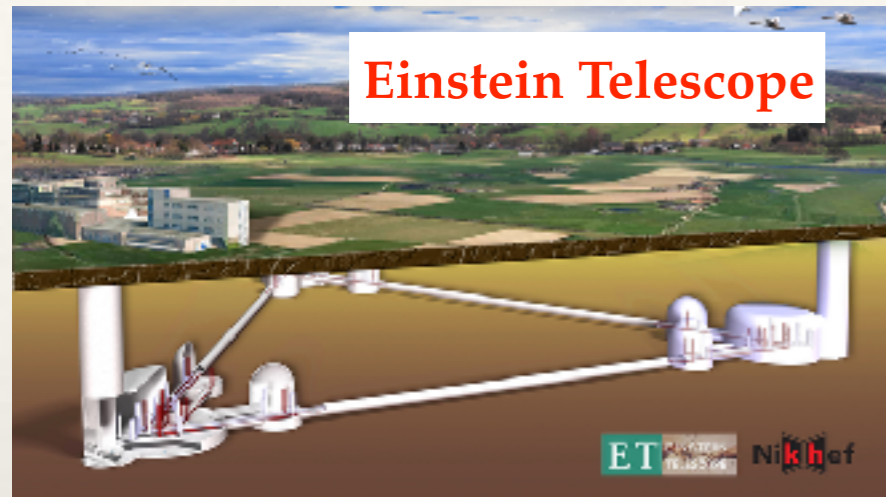
L'astronomie multi-messager est en plein boom en ce moment. Les deux événements GW170817 et IC170922 ont révolutionné ce domaine. Le futur sera encore plus brillant, probablement avec des résultats inattendus.

Chaque messenger apporte une pièce des puzzles géants qui constituent les objets célestes. Les échanges avec les théoriciens permettent d'ajuster ces pièces.

Une des clefs du succès est la nécessaire inter-communication en temps réel entre tous ces observatoires, de plus en plus les données deviennent publiques. C'est presque fini le temps où une expérience / télescope pouvait sortir des résultats tout seul.

Futur

Einstein Telescope



LSST



ATHENA



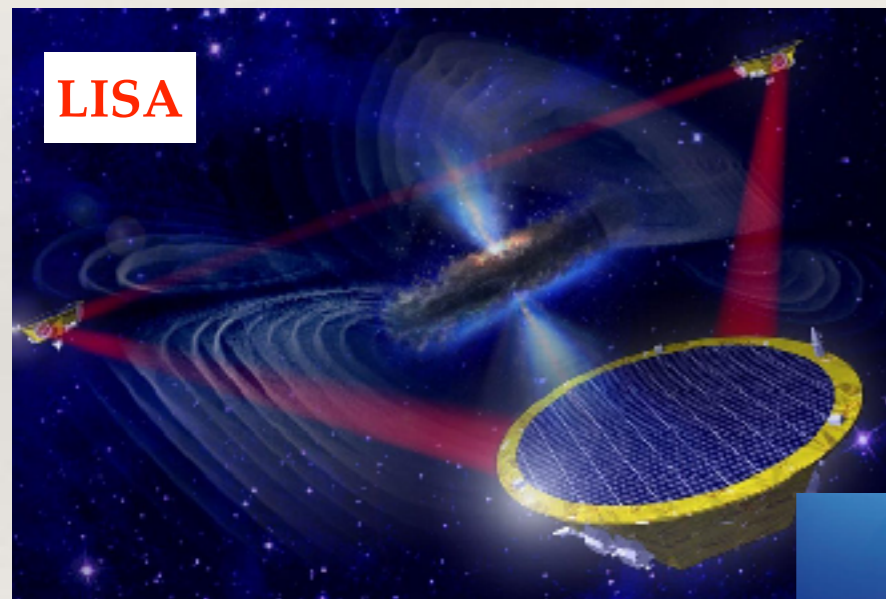
CTA



SVOM



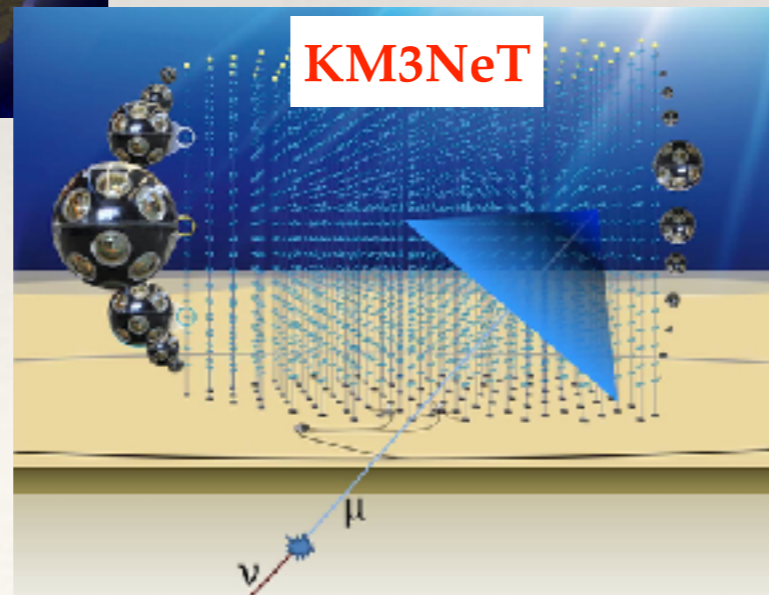
LISA



SKA



KM3NeT



IceCube Gen2

